

ANÁLISE NUMÉRICA DA REPRESENTATIVIDADE DE ENSAIOS COM MACACOS PLANOS EM PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA

BRUNO DE SOUSA OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor João Paulo Miranda Guedes

Co-Orientador: Engenheiro Luís Miranda

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

Os grandes problemas de engenharia civil resolvem-se na fase de concepção.
Nelson Vila Pouca

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento terá de ser dirigido ao Professor João Miranda Guedes pela forma superior como orientou este trabalho, com entusiasmo, boa disposição e competência, evidenciados pelo apoio incondicional prestado com todas as suas qualidades como pessoa.

Um agradecimento especial à colega de investigação Catarina Costa que, com toda a sua disponibilidade, simpatia e ajuda, me permitiu ultrapassar os momentos mais delicados deste trabalho.

Um agradecimento sincero aos colegas de investigação Luís Miranda, Celeste Almeida e Valter Lopes, pelo apoio nos detalhes da modelação e análise, bem como pelo companheirismo demonstrado.

Um agradecimento ao Sr. Valdemar e ao André, pela colaboração e tempo partilhado, durante o ensaio experimental que acompanhou a presente dissertação.

Um agradecimento muito especial aos amigos Luís Sousa, Joana Delgado, Luís Macedo, Mariana Santiago e Joana Bailão pela amizade e companhia, sem os quais nada disto seria possível.

Por fim, quero expressar o meu profundo agradecimento aos meus pais, à minha irmã e cunhado pelo amor, apoio e compreensão que sempre souberam demonstrar.

RESUMO

As estruturas de alvenaria de pedra constituem hoje em dia uma área de grande interesse na Engenharia Civil, não só pela necessidade de reabilitação de construções em geral mas também pelo potencial que este tipo de material demonstra. Como tal, a compreensão do seu comportamento e a correcta avaliação das suas propriedades mecânicas revelam-se de grande importância. Para este efeito é essencial dispor de técnicas e métodos experimentais que permitam avaliar com rigor, estas características.

Neste trabalho é efectuada a análise numérica de uma parede de alvenaria de pedra simulando a aplicação do ensaio de macacos planos. Trata-se de uma análise tridimensional com elementos finitos usando o programa de cálculo Cast3M (CEA, 1990) e considerando diferentes estratégias de modelação com diferentes níveis de complexidade geométrica. Foram adoptados dois tipos de modelos de comportamento material diferentes: linear elástico e o não-linear. O modelo não-linear utilizado foi o modelo de dano contínuo (Faria, 1994), inicialmente desenvolvido para a análise de estruturas constituídas por grandes massas de betão.

A modelação da parede de alvenaria de pedra foi feita considerando a sua composição homogénea de modo a simplificar a análise dos padrões de rotura. Para simplificação do cálculo foi utilizada uma malha de elementos finitos relativa a meia parede simulando-se as condições de simetria. As condições de carga são constituídas pelo peso próprio, carga distribuída uniforme na face superior da parede e cargas distribuídas nos rasgos, simulando assim a aplicação dos macacos planos. Os resultados das várias análises foram discutidos e comparados com o “real” comportamento numérico das paredes em termos de análise do estado de tensão e de deformação dos vários elementos da estrutura.

É objectivo desta tese apurar a fiabilidade deste tipo de ensaio aplicado a paredes de alvenaria de pedra. São utilizadas diferentes configurações geométricas da parede de modo a comparar as tensões que se desenvolvem para cada caso, bem como as respectivas deformações, concluindo-se sobre a representatividade deste ensaio na determinação das curvas de comportamento de um material de características pré-definidas ideais, mas próximas às de uma alvenaria de pedra.

PALAVRAS-CHAVE: Alvenaria de Pedra, Modelação Não-Linear, Análise Numérica Tridimensional, Macacos Planos, Ensaio NDT.

ABSTRACT

The structures of stone masonry are, nowadays, an area of great interest in Civil Engineering, not only because of the need for rehabilitation of buildings in general but also by the potential that this type of material shows. As such, understanding the behavior and proper consideration of their mechanical properties are proved of great importance. For this purpose it is essential to have techniques and experimental methods to evaluate accurately these characteristics.

A numerical analysis of a wall of stone masonry is carried out in this work, simulating the application of the flat-jacks test. This is a three-dimensional finite element analysis using the calculation program Cast3M (CEA, 1990) and considering different modeling strategies with different levels of geometric complexity. Two different kinds of material models behavior were adopted, being, the linear elastic and nonlinear. The nonlinear model used was the continuum damage model (Faria, 1994), initially developed for the analysis of structures composed of large masses of concrete.

The modeling of the stone masonry wall was conceived considering its homogeneous composition in order to simplify the analysis of failure patterns. To simplify the calculation a finite element mesh was used related to a half-wall simulating the symmetry conditions. The loading conditions will be formed by the self weight, uniform distributed load on the upper surface of the wall and distributed loads in the specific openings, thus simulating the application of the flat-jacks. The results of several reviews were discussed and compared with the "real" numerical behavior of the walls in terms of analysis of the stress and deformation of the various elements of the structure.

The aim of this thesis is to investigate the reliability of this type of test applied to stone masonry walls. Different geometric configurations of the wall are applied in order to compare the tensions that develop in each case as well as their respective strains, concluding on the representativeness of this test in determining the behavior curves of a material with pre-defined ideal features, but close to a stone masonry.

KEYWORDS: Stone Masonry, Non-Linear Simulation, Tri-dimensional Numerical Analysis, Flat-Jacks, NDT Reviews.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. ALVENARIA DE PEDRA	2
1.2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	2
1.2.2. CARACTERIZAÇÃO E TIPOLOGIAS	4
1.2.3. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL	6
1.3. ÂMBITO DO TRABALHO	6
1.4. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS	7
1.5. REFERÊNCIAS	7

2. ENSAIOS DE MACACOS PLANOS	9
2.1. GENERALIDADES	9
2.2. ENSAIO SIMPLES	11
2.3. ENSAIO DUPLO	13
2.4. METODOLOGIA DE CÁLCULO	15
2.4.1. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO (ENSAIO SIMPLES)	15
2.4.2. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE (ENSAIO DUPLO)	15
2.4.3. ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	16
2.5. OBSERVAÇÕES ÀS NORMAS	16
2.6. REFERÊNCIAS	18

3. ENSAIO EXPERIMENTAL	19
3.1. GENERALIDADES	19
3.2. PROCEDIMENTO	20
3.2.1. ENSAIO SIMPLES.....	20
3.2.2. ENSAIO DUPLO	20

3.3. RESULTADOS	21
3.3.1. ENSAIO SIMPLES	21
3.3.2. ENSAIO DUPLO	23
3.4. CONCLUSÕES	24
3.5. REFERÊNCIAS	24

4. MODELAÇÃO E GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

4.1. GENERALIDADES	25
4.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	25
4.2.1. GENERALIDADES	25
4.2.2. TIPO DE ELEMENTO	26
4.3. MODELAÇÃO DA MALHA	28
4.3.1. GEOMETRIA DA PAREDE	28
4.3.2. MODELAÇÃO DOS RASGOS NO BLOCO CENTRAL	29
4.3.3. PAREDE BASE	35
4.3.4. CONDIÇÃO DE SIMETRIA	36
4.3.5. CASOS DE ESTUDO	36
4.4. GERAÇÃO DA MALHA	38
4.5. REFERÊNCIAS	39

5. CARACTERIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

5.1. GENERALIDADES	41
5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO	41
5.2.1. CONDIÇÃO DE SUPORTE	41
5.2.2. CONDIÇÃO ISOSTÁTICA	42
5.2.3. CONDIÇÃO DE SIMETRIA	42
5.3. CARACTERIZAÇÃO DAS AÇÕES	43
5.3.1. PESO PRÓPRIO (PP)	43
5.3.2. FORÇA APLICADA NO TOPO DA PAREDE (FT)	43
5.3.3. FORÇAS APLICADAS NOS RASGOS (FM)	44
5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO	46
5.4.1. MODELO DE COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO	46

5.4.2. MODELO DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR.....	47
5.5. REFERÊNCIAS	52

6. ANÁLISE DE RESULTADOS	53
6.1. GENERALIDADES	53
6.2. MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS	54
6.3. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE.....	55
6.3.1. DESCRIÇÃO GERAL	55
6.3.2. COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO.....	56
6.3.2.1. Peso Próprio e Força no Topo da Parede (PP+FT).....	56
6.3.2.2. Força nos Rasgos (FM).....	59
6.3.3. COMPORTAMENTO NÃO LINEAR.....	62
6.3.3.1. Peso Próprio e Força no Topo da Parede (PP+FT).....	62
6.3.3.2. Força nos Rasgos (FM).....	64
6.3.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	67
6.3.4.1. Peso Próprio e Força no Topo da Parede (PP+FT).....	67
6.3.4.2. Força nos Rasgos (FM).....	68
6.4. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE (PLACAS RÍGIDAS)	72
6.4.1. COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO.....	72
6.4.2. COMPORTAMENTO NÃO LINEAR.....	75
6.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	78
6.4.3.1. Comparação Linear / Não Linear	78
6.4.3.2. Comparação Não Linear (Caso Base) / Não Linear (Caso das Placas Rígid	81
6.5. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE (FT = 140KN).....	85
6.6. ANÁLISE DO CASO 2.....	90
6.7. ANÁLISE DO CASO 3.....	95
6.8. ANÁLISE DO CASO 4.....	100
6.9. ANÁLISE DO CASO 5.....	105
6.10. ANÁLISE DO CASO 6	110
6.11. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE (FT = 280KN)	115
6.12. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS	115
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	117

A. ANEXO	119
A.1. MODELAÇÃO DA MALHA	119
A.2. MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS	120
A.3. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE	121
A.4. ANÁLISE DO CASO DAS PLACAS RÍGIDAS	129
A.5. ANÁLISE DO CASO FT=140KN	134
A.6. ANÁLISE DO CASO 2	138
A.7. ANÁLISE DO CASO 3	142
A.8. ANÁLISE DO CASO 4	146
A.9. ANÁLISE DO CASO 5	150
A.10. ANÁLISE DO CASO 6	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 – Coliseu de Roma (Itália).....	2
Fig.1.2 – Exemplos de edifícios históricos em alvenaria de pedra	3
Fig.1.3 – Classificação quanto ao tipo de aparelho [1]	4
Fig.1.4 – Classificação quanto ao assentamento [1]	5
Fig.1.5 – Classificação quanto ao número de paramentos [1].....	5
Fig.1.6 – Muralha da China (China)	6
Fig.2.1 – Macacos Planos com diferente geometria [9]	9
Fig.2.2 – Exemplos de Macacos Planos com diferentes dimensões [5].....	10
Fig.2.3 – Chapa de aço de espessura reduzida [8]	11
Fig.2.4 – Macaco Plano encaixado num rasgo de parede de Alvenaria de Pedra [10].....	11
Fig.2.5 – Ensaio Simples de Macacos Planos [5]	12
Fig.2.6 – Diferentes Fases do Ensaio Simples [8]	13
Fig.2.7 – Ensaio Duplo de Macacos Planos [5]	13
Fig.2.8 – Ensaio Duplo com posição inicial de referência	14
Fig.2.9 – Distância entre macacos no Ensaio Duplo	14
Fig.2.10 – Alvenaria de Pedra irregular	17
Fig.3.1 – Parede testada com a técnica de macacos planos [1]	19
Fig.3.2 – Ensaio Simples da parede de alvenaria de pedra [1]	20
Fig.3.3 – Ensaio Duplo da parede de alvenaria de pedra [1].....	21
Fig.3.4 – Evolução dos deslocamentos por patamar de pressão [1]	22
Fig.3.5 – Evolução dos deslocamentos em cada alinhamento [1].....	22
Fig.3.6 – Esquema da disposição dos LVDTs utilizados no ensaio [1]	23
Fig.3.7 – Gráficos Tensão/Extensão do Ensaio Duplo [1]	23
Fig.3.8 – Gráfico Tensão/Extensão média dos LVDTs verticais e do LVDT horizontal [1].....	24
Fig.4.1 – Elementos Finitos mais comuns [2]	26
Fig.4.2 – Elemento Finito Tridimensional Hexaedro de 8 nós	27
Fig.4.3 – Formulação isoparamétrica do elemento Hexaedro de 8 nós.	27
Fig.4.4 – Dimensões da Parede Base (3.0x3.0x0.40m)	28
Fig.4.5 – Dimensões dos Rasgos no Bloco Central em metros	29
Fig.4.6 – Localização dos Rasgos no Bloco Central em metros	29
Fig.4.7 – Modelação 001 do Bloco Central	30

Fig.4.8 – Modelação 002 do Bloco Central	30
Fig.4.9 – Modelação 003 do Bloco Central	31
Fig.4.10 – Modelação 004 do Bloco Central	31
Fig.4.11 – Processamento dos volumes do Bloco Central no GID	32
Fig.4.12 – Malha refinada do Bloco Central no GID	32
Fig.4.13 – Erro de geração do elemento hexaédrico no Cast3M.....	33
Fig.4.14 – Nova formulação da malha na zona dos rasgos	33
Fig.4.15 – Nova formulação da abertura do rasgo no Bloco Central	34
Fig.4.16 – Modelação final do Bloco Central.....	34
Fig.4.17 – Modelação final de um dos Blocos Laterais da Parede	35
Fig.4.18 – Modelação final da Parede Base	35
Fig.4.19 – Condição de Simetria da Parede.....	36
Fig.4.20 – Caso 1 (Parede Base)	37
Fig.4.21 – Caso 2 (com Fiadas Laterais)	37
Fig.4.22 – Caso 3 (com Fiada Superior)	37
Fig.4.23 – Caso 4 (com Fiadas Laterais e Superior).....	37
Fig.4.24 – Caso 5 (com Fiada Traseira).....	38
Fig.4.25 – Caso 6 (com Fiadas Superior e Traseira)	38
Fig.4.26 – Parede Base no Cast3M	39
Fig.4.27 – Pormenor dos Rasgos no Cast3M	39
Fig.5.1 – Condição de suporte da Parede.....	42
Fig.5.2 – Condição Isostática da Parede.....	42
Fig.5.3 – Condição de simetria da Parede.	43
Fig.5.4 – Aplicação da força FT na parede	44
Fig.5.5 – Planos das faces horizontais dos rasgos	44
Fig.5.6 – Sentidos das forças FM nos rasgos	45
Fig.5.7 – Numeração dos nós e respectivas áreas de influência.....	45
Fig.5.8 – Representação do conceito de área resistente efectiva [1]	47
Fig.5.9 – Comportamento uniaxial do material, segundo o Modelo de Dano [1]	48
Fig.5.10 – Parede de Alvenaria de Pedra PP2 [6]	49
Fig.5.11 – Lei de Comportamento em Compressão [6]	50
Fig.5.12 – Lei de Comportamento em Tracção [6].....	50
Fig.6.1 – Bases de medição verticais.....	54

Fig.6.2 – Bases de medição horizontais	54
Fig.6.3 – Malha de Elementos Finitos	56
Fig.6.4 – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT	57
Fig.6.5 – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT+FM	59
Fig.6.6 – Extensões lineares para a acção FM	61
Fig.6.7 – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT	62
Fig.6.8 – Mapa de Tensões Gerais devido à acção PP+FT+FM	64
Fig.6.9 – Mapa de Tensões Gerais SMZZ devido à acção PP+FT+FM (Perspectiva Traseira)	65
Fig.6.10 – Extensões não lineares para a acção FM	66
Fig.6.11 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção FM	67
Fig.6.12 – Corte do rasgo superior no mapa de tensões gerais SMZZ, para PP+FT+FM	69
Fig.6.13 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	70
Fig.6.14 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM.	70
Fig.6.15 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM	71
Fig.6.16 – Placas Rígidas na zona dos rasgos	72
Fig.6.17 – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT+FM	73
Fig.6.18 – Extensões lineares para a acção FM	75
Fig.6.19 – Mapa de Tensões Gerais devido à acção PP+FT+FM	76
Fig.6.20 – Extensões não lineares para a acção FM	77
Fig.6.21 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	79
Fig.6.22 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	79
Fig.6.23 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM	80
Fig.6.24 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	82
Fig.6.25 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	82
Fig.6.26 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM	83
Fig.6.27 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM	83
Fig.6.28 – Cortes do Caso das Placas Rígidas com FM=56KN	84
Fig.6.29 – Extensões não lineares para a acção FM	86
Fig.6.30 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	87
Fig.6.31 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	87
Fig.6.32 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM	88
Fig.6.33 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM	88
Fig.6.34 – Extensões não lineares para a acção FM	91

Fig.6.35 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	92
Fig.6.36 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	92
Fig.6.37 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM.....	93
Fig.6.38 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM.....	93
Fig.6.39 – Extensões não lineares para a acção FM	96
Fig.6.40 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	97
Fig.6.41 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	97
Fig.6.42 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM.....	98
Fig.6.43 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM.....	98
Fig.6.44 – Extensões não lineares para a acção FM	101
Fig.6.45 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	102
Fig.6.46 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	102
Fig.6.47 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM.....	103
Fig.6.48 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM.....	103
Fig.6.49 – Extensões não lineares para a acção FM	106
Fig.6.50 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	107
Fig.6.51 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	107
Fig.6.52 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM.....	108
Fig.6.53 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM.....	108
Fig.6.54 – Extensões não lineares para a acção FM	111
Fig.6.55 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM	112
Fig.6.56 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM	112
Fig.6.57 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM.....	113
Fig.6.58 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM.....	113
Fig.A.1 – Numeração dos Blocos da Parede (Vista de Alçado Frontal)	120
Fig.A.2 – Pormenor da deformada da parede entre os rasgos para a acção PP+FT.....	121
Fig.A.3 – Pormenor da deformada da parede entre os rasgos para a acção PP+FT+FM.	121
Fig.A.4 – Deslocamentos lineares para a acção PP+FT	122
Fig.A.5 – Deslocamentos não lineares para a acção PP+FT	122
Fig.A.6 – Deslocamentos lineares para a acção FM.....	123
Fig.A.7 – Deslocamentos não lineares para a acção FM.....	123
Fig.A.8 – Pormenor da deformada da parede entre os rasgos para a acção PP+FT+FM	129
Fig.A.9 – Deslocamentos lineares para a acção FM.....	130

Fig.A.10 – Deslocamentos não lineares para a acção FM	130
Fig.A.11 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (Caso FT=140KN)	132
Fig.A.12 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (Caso 2)	138
Fig.A.13 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (Caso 3).	142
Fig.A.14 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (Caso 4)	146
Fig.A.15 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (Caso 5)	150
Fig.A.16 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (Caso 6)	154

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 – Distribuição da Força FM nos nós dos rasgos.....	46
Quadro 5.2 – Parâmetros para a Análise Linear Elástica.....	47
Quadro 5.3 – Parâmetros do Modelo de Dano Contínuo no Cast3m [4]	49
Quadro 5.4 – Valores assumidos para os parâmetros no Cast3m	51
Quadro 6.1 – Casos de Estudo	53
Quadro 6.2 – Comprimentos dos LVDTs	55
Quadro 6.3 – Deslocamentos lineares para a acção PP+FT (mm)	57
Quadro 6.4 – Valores das extensões lineares para a acção PP+FT	58
Quadro 6.5 – Deslocamentos lineares para a acção FM (mm)	60
Quadro 6.6 – Valores das extensões lineares para a acção FM	60
Quadro 6.7 – Deslocamentos não lineares para a acção PP+FT (mm)	63
Quadro 6.8 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	65
Quadro 6.9 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT	67
Quadro 6.10 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT	68
Quadro 6.11 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM.....	68
Quadro 6.12 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	69
Quadro 6.13 – Valores médios de Deformabilidade para a acção FM	71
Quadro 6.14 – Deslocamentos lineares para a acção FM (mm)	74
Quadro 6.15 – Extensões lineares para a acção FM.....	74
Quadro 6.16 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	77
Quadro 6.17 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM.....	78
Quadro 6.18 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	78
Quadro 6.19 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM.....	80
Quadro 6.20 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM.....	81
Quadro 6.21 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	81
Quadro 6.22 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM.....	84
Quadro 6.23 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	85
Quadro 6.24 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM.....	86
Quadro 6.25 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	86
Quadro 6.26 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM.....	89
Quadro 6.27 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	90

Quadro 6.28 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM	91
Quadro 6.29 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	91
Quadro 6.30 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM	94
Quadro 6.31 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	95
Quadro 6.32 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM	96
Quadro 6.33 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	96
Quadro 6.34 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM	99
Quadro 6.35 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	100
Quadro 6.36 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM	101
Quadro 6.37 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	101
Quadro 6.38 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM	104
Quadro 6.39 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	105
Quadro 6.40 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM	106
Quadro 6.41 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	106
Quadro 6.42 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM	109
Quadro 6.43 – Deslocamentos não lineares para a acção FM (mm)	110
Quadro 6.44 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM	111
Quadro 6.45 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM	111
Quadro 6.46 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM	114
Quadro 6.47 – Quadro Resumo das diferentes aplicações de carga	115
Quadro 6.48 – Resumo das principais observações registadas	116
Quadro A.1 – Nº de Elementos Hexaédricos de cada bloco da Parede	119
Quadro A.2 – Comprimentos das bases de medição	120
Quadro A.3 – Extensões não lineares verticais para a acção PP+FT (Base A)	124
Quadro A.4 – Extensões não lineares verticais para a acção PP+FT (Base B)	125
Quadro A.5 – Extensões não lineares horizontais para a acção PP+FT	126
Quadro A.6 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A)	127
Quadro A.7 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B)	128
Quadro A.8 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM	129
Quadro A.9 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A)	131
Quadro A.10 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B)	132
Quadro A.11 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM	133
Quadro A.12 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso FT=140KN)	135

Quadro A.13 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso FT=140KN).....	136
Quadro A.14 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM (Caso FT=140KN)	137
Quadro A.15 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 2)	139
Quadro A.16 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 2)	140
Quadro A.17 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM (Caso 2)	141
Quadro A.18 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 3)	143
Quadro A.19 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 3)	144
Quadro A.20 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM (Caso 3)	145
Quadro A.21 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 4)	147
Quadro A.22 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 4)	148
Quadro A.23 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM (Caso 4)	149
Quadro A.24 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 5)	151
Quadro A.25 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 5)	152
Quadro A.26 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM (Caso 5)	153
Quadro A.27 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 6)	155
Quadro A.28 – Extensões não lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 6)	156
Quadro A.29 – Extensões não lineares horizontais para a acção FM (Caso 6)	157

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LESE – Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural

NDT – *Non Destructive Test*

MEF – Método de Elementos Finitos

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

CAD – *Computer Aided Design*

PP – Acção do Peso Próprio [KN]

FT – Força no Topo da Parede [KN]

FM – Força nos Rasgos da Parede [KN]

E – Módulo de Elasticidade [GPa]

ε – Extensão (‰)

ν – Coeficiente de Poisson

SMXX – Tensão Geral segundo o eixo X do referencial [MPa]

SMYY – Tensão Geral segundo o eixo Y do referencial [MPa]

SMZZ – Tensão Geral segundo o eixo Z do referencial [MPa]

$D_{\text{máx}}$ – Deslocamento máximo registado nos LVDTs verticais

$A_{\text{máx}}$ – Deslocamento máximo da altura da parede no alinhamento dos rasgos

1

INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

Existe hoje um interesse elevado na reabilitação de construções tradicionais, por vezes de valor histórico e patrimonial. O estudo de uma construção, com a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais estruturais e das anomalias existentes, permite avaliar o seu desempenho estrutural e também a necessidade, ou não, de implementar medidas correctivas. Esta avaliação exige conhecimento específico sobre as propriedades dos materiais, o que pode colocar um problema de maior, visto que em alguns casos a única maneira de determinar a caracterização estrutural passa por recolher uma amostra da própria estrutura ou realizar ensaios *in-situ*.

Entende-se assim que o diagnóstico do estado de construções históricas só pode ser efectuado se houver um conhecimento das características dos materiais. A inspecção visual, avaliação geométrica e definição de padrões de ruptura são necessários para perceber os danos envolvidos e as suas causas. Após estas operações é essencial reunir as condições estruturais: forças aplicadas, condições de apoio, tensões instaladas, entre outros elementos de estudo. Por norma, os ensaios realizados para este efeito dependem de amostras retiradas da estrutura original, procedimento que em alguns casos não é compatível com o nível de preservação pretendida. De modo a garantir a integridade da estrutura recorre-se então a ensaios de índole não destrutiva (*Non Destructive Test* – NDT).

No que se refere ao campo de avaliação *in situ* de paredes de alvenaria, é importante destacar dois tipos de ensaio experimental utilizados na área de investigação: o ensaio sónico e o ensaio de macacos planos. O ensaio sónico permite caracterizar a estrutura de uma parede de uma forma não destrutiva, através da determinação da velocidade de propagação de ondas elásticas ao longo do material que a constitui. O ensaio de macacos planos permite conhecer o estado de tensão *in-situ* e as curvas de comportamento da estrutura.

O ensaio de macacos planos constitui o caso de estudo da presente dissertação pois é cada vez mais utilizado e possui uma das únicas técnicas de análise não destrutiva em paredes de alvenaria estrutural que permite uma avaliação quantitativa directa das características mecânicas. Esta técnica permite obter valores numéricos para as tensões instaladas numa parede bem como estimar o seu módulo de deformabilidade e nalguns casos a resistência máxima. Este tipo de ensaio será devidamente abordado nos capítulos 2 e 3.

No presente capítulo será introduzido o material de alvenaria de pedra, fazendo um breve enquadramento histórico, realçando as suas diferentes propriedades e tipologias, bem como o seu comportamento estrutural.

1.2. ALVENARIA DE PEDRA

1.2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A origem da palavra alvenaria deriva do árabe e significa o trabalho feito pelo pedreiro (al-banná). Alvenaria é a construção de estruturas e de paredes por sobreposição de elementos individuais unidos, ou não, entre si através de argamassa. A pedra, tijolo e os blocos de betão são alguns dos elementos normalmente utilizados nesta técnica. Na Figura 1.1 apresenta-se um dos edifícios de alvenaria de pedra mais emblemáticos: o Coliseu de Roma.



Fig.1.1 – Coliseu de Roma (Itália)

Em particular, a alvenaria de pedra foi durante séculos uma técnica estrutural muito utilizada na área de construção, o que faz com que hoje existam inúmeras estruturas deste tipo, de entre as quais monumentos de grande valor patrimonial, cultural e arquitectónico. Este facto torna a sua conservação ou reabilitação numa tarefa ainda mais delicada quando se pretende preservar a herança deixada pelos nossos antepassados.

Antigamente o Homem baseava-se fortemente na alvenaria de pedra para construir os mais impressionantes e duradouros monumentos das suas civilizações. Os Egípcios construíram as suas pirâmides, as civilizações da América Central tiveram as suas pirâmides de degraus, os Persas com os seus palácios, os Gregos tiveram os seus templos, e os Romanos construíram toda uma nova Arquitectura em redor deste material.

Nestas culturas é notória a importância da alvenaria na construção, principalmente nos grandes centros urbanos onde ainda hoje é possível verificar alguns dos mais imponentes marcos históricos deste tipo de construção. É também possível verificar ao longo da história que, com a evolução destas sociedades, também as técnicas construtivas sofreram melhorias significativas, de tal modo que civilizações como os Romanos ou Egípcios se tornaram referências no que diz respeito ao uso deste material e à sua materialização de grandiosidade e solidez. Na Figura 1.2 apresentam-se alguns dos exemplos mais marcantes, de construções de alvenaria de pedra, deixados por estas civilizações.



(a) Pirâmides de Gizé (Egipto)



(b) Fórum Romano (Itália)



(c) Partenon de Atenas (Grécia)



(d) Chichén Itzá (México)

Fig.1.2 – Exemplos de edifícios históricos em alvenaria de pedra.

De entre muitas razões, o uso de alvenaria está associado à sua durabilidade, solidez e baixo custo de manutenção. Todavia, a razão mais forte para o seu uso é a sua simplicidade: a sobreposição de peças sólidas dispostas umas sobre as outras, por vezes ligadas com argamassa, é um processo de construção fácil e de rápida aprendizagem.

Apesar de toda a história ligada à construção em alvenaria de pedra e das inúmeras vantagens que a tornaram tão atractiva, hoje em dia são muito poucas as construções que se baseiam no uso deste material, sobretudo devido ao peso económico que o uso de alvenaria começou a implicar, nomeadamente no que diz respeito ao custo e transporte do material.

Inicialmente, o método de cálculo para este tipo de construção era muito empírico, o que por vezes resultava num sub ou sobredimensionamento da estrutura. Actualmente, com a necessidade de se construir de forma mais económica, para se construir em alvenaria tiveram que se desenvolver métodos mais refinados e precisos de cálculo, para transformar a alvenaria num material sustentável. Por isso em países onde se usa muito a alvenaria na construção, o método empírico de cálculo de alvenarias está a ser substituído por cálculos analíticos. Em Portugal, e outros países da Europa, já existem normas para este tipo de estrutura (Eurocódigo 6).

1.2.2. CARACTERIZAÇÃO E TIPOLOGIAS

A alvenaria de pedra é um material compósito heterogêneo, intrinsecamente descontínuo, com boa resistência à compressão e fraca resistência à tracção, caracterizada por: uma diversificada constituição interna, dependendo da época, dos costumes e do local de construção; uma grande irregularidade geométrica e falta de homogeneidade material, como resultado da diversidade de características dos materiais utilizados.

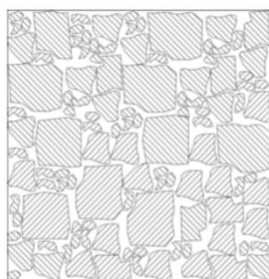
As pedras utilizadas podem ser de diversa natureza, forma e dimensão, regulares e/ou irregulares, e podem apresentar-se ligadas com terra, argila e argamassa que raramente envolve completamente as pedras.

As paredes de alvenaria de pedra com funções estruturais podem ser classificadas tipologicamente em função das suas características construtivas, tendo por base quatro parâmetros:

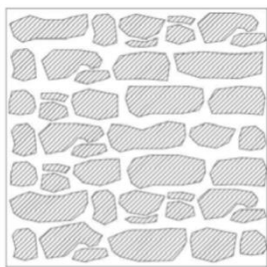
- Tipo de pedras usadas;
- Secção das pedras;
- Assentamento;
- Argamassa de ligação das pedras.

As paredes de alvenaria de pedra podem ser classificadas quanto ao tipo de aparelho como [1]:

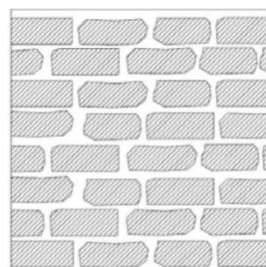
- de juntas desalinhadas (Fig.1.3.a);
- de juntas irregulares alinhadas (Fig.1.3.b);
- de juntas regulares alinhadas (Fig.1.3.c).



(a)



(b)



(c)

Fig.1.3 – Classificação quanto ao tipo de aparelho [1]

As paredes de alvenaria podem ainda ter diferentes tipos de assentamento [1]:

- (a) horizontal;
- (b) horizontal/vertical;
- (c) aleatório;
- (d) escalonado com fiadas de regularização;
- (e) em espinha de peixe;
- (f) com calços ou cunhas.

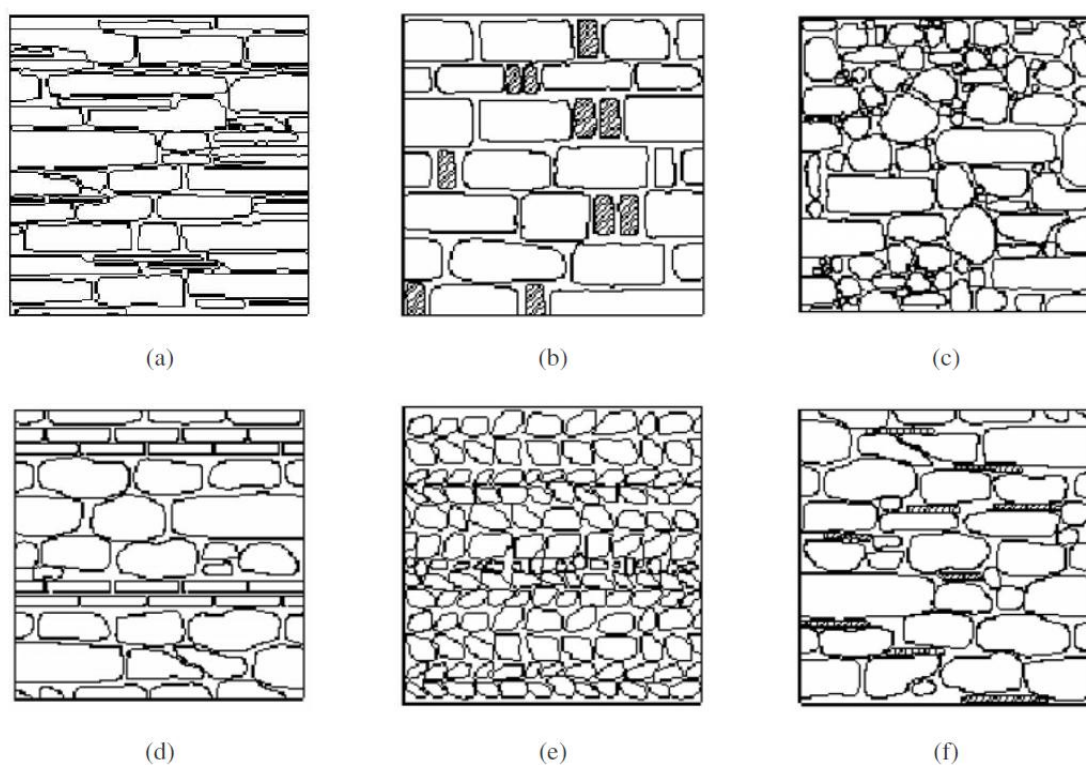


Fig.1.4 – Classificação quanto ao assentamento [1]

As paredes de alvenaria classificam-se também segundo a sua secção/paramento [1]:

- (a) de paramento simples;
- (b) de dois paramentos sem ligações;
- (c) de dois paramentos com ligações;
- (d) de três paramentos com núcleo de fraca qualidade.

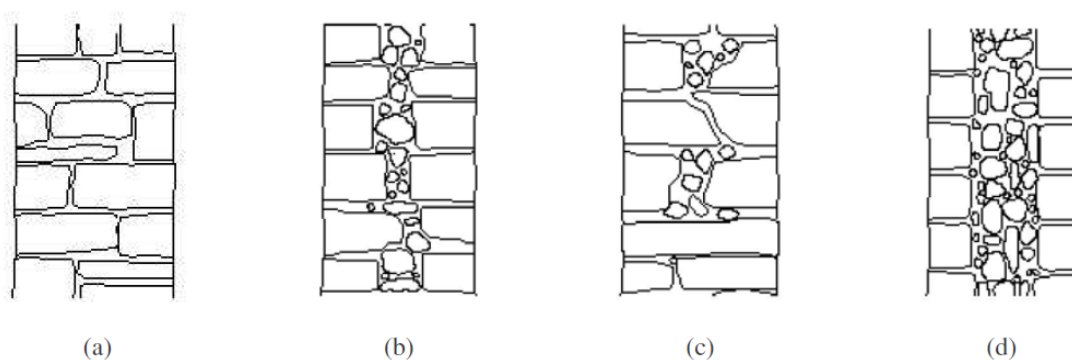


Fig.1.5 – Classificação quanto ao número de paramentos [1]

1.2.3. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

O comportamento estrutural das paredes resistentes de alvenaria de pedra caracteriza-se por apresentarem um elevado peso próprio cujo principal objectivo é estabilizar as forças horizontais derrubantes e deslizantes. As paredes apresentam, geralmente, uma espessura considerável, que tinha como função diminuir a esbelteza reduzindo-se o risco de instabilidade por encurvadura. Por norma, as paredes resistentes apresentam como denominador comum as seguintes características mecânicas:

- boa resistência a esforços de compressão;
- menor resistência ao corte;
- fraca resistência à flexão e à tracção.

Nas edificações antigas, construções até ao início do séc. XX, as paredes exteriores tinham a função adicional de conseguirem mobilizar a resistência mecânica necessária para garantir a estabilidade do conjunto.



Fig.1.6 – Muralha da China (China)

1.3. ÂMBITO DO TRABALHO

Com este trabalho pretende-se, através da modelação numérica, avaliar e compreender a representatividade da tecnologia não destrutiva do ensaio com Macacos Planos aplicada a paredes de alvenaria de pedra.

Foi feita uma modelação de uma parede simétrica com características homogéneas através de um software de cálculo que permitiu avaliar a aproximação dos resultados deste tipo de ensaio aplicado a paredes de alvenaria de pedra ao “real” comportamento da parede.

Foi realizada, numa primeira instância, uma análise linear elástica do comportamento do material e da estrutura e avaliadas as tensões e as deformações causadas pelo carregamento induzido pelos macacos planos. A interpretação destes fenómenos exige algum cuidado, pelo que também se efectuou uma análise não-linear, utilizando um modelo de dano contínuo, adaptada e calibrada para o “real” comportamento de uma estrutura deste tipo, ensaiada no LESE (Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural).

1.4. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS

Para além do presente capítulo, cuja descrição se dispensa, esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos que passam a ser descritos.

No Capítulo 2 apresenta-se a técnica de ensaios com macacos planos, onde se descreve o procedimento de ensaio e o método de análise. Também se abordou a norma relativa a este tipo de ensaio, bem como as condicionantes no que respeita à sua utilização.

O Capítulo 3 irá conter informação relativa ao ensaio experimental efectuado numa parede de alvenaria de pedra, bem como aos procedimentos e tipos de resultado que lhe estão associados. Esta aplicação serve como complemento ao Capítulo 2.

O Capítulo 4 é dedicado à modelação da estrutura. Faz-se uma breve introdução ao Método de Elementos Finitos, onde consta uma descrição do elemento utilizado na discretização dos vários modelos, a saber, o elemento isoparamétrico tridimensional hexaédrico de 8 nós. Descreve-se a tipologia e geometria de parede a estudar, bem como os métodos e hipóteses considerados na geração do modelo numérico e respectiva malha de elementos finitos.

No Capítulo 5 apresentam-se as características associadas à análise da estrutura. São apresentadas as condições de apoio assumidas para a estrutura, as acções aplicadas e as propriedades assumidas para os materiais. No final, constará uma breve descrição do modelo não-linear material utilizado para a análise, assim como os parâmetros utilizados para o efeito.

O Capítulo 6 apresenta e discute os diferentes casos estruturais analisados e descritos no Capítulo 5. Algumas secções serão reservadas para análises comparativas entre casos.

O Capítulo 7 é constituído pelas considerações finais, onde se procurará resumir os principais resultados associados à análise global efectuada.

1.5. REFERÊNCIAS

- [1] Silva, B. (2008) – *Aplicação de um Modelo de Dano Contínuo na Modelação de Estruturas de Alvenaria de Pedra*, Dissertação de Mestrado, FEUP.
- [2] Ramos, J. (2002), *Análise Experimental e Numérica de Estruturas Históricas de Alvenaria*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

2

ENSAIOS DE MACACOS PLANOS

2.1. GENERALIDADES

O ensaio com macacos planos utiliza-se, principalmente, para determinar o estado de tensão e avaliar as características de deformabilidade e resistência de paredes e outros elementos estruturais de alvenaria. O macaco plano pode ser descrito como uma almofada em chapa metálica de reduzida área e espessura (Fig.2.1), que pode ser pressurizada com óleo hidráulico [1]. O ensaio baseia-se na libertação do estado de tensão, através da realização de um ou dois entalhes profundos na parede, seguida de aplicação de cargas através dos macacos planos, inseridos previamente nos entalhes. A utilização de um macaco plano permite determinar o valor da tensão existente na parede, e a utilização de dois macacos planos, situados em dois entalhes paralelos, permite estimar as características de deformabilidade e de resistência máxima.

A razão pela qual estes ensaios são utilizados reside no facto de constituírem ensaios MDT (medianamente destrutivos) que permitem avaliar as paredes de alvenaria *in-situ* sem danificar a sua estrutura. Este procedimento é directo e exige apenas a remoção de uma porção de argamassa da respectiva junta onde é feito o entalhe. Por este facto, o método é considerado como ligeiramente destrutivo, apesar de o dano ser temporário e poder ser facilmente reparado após o ensaio [6].

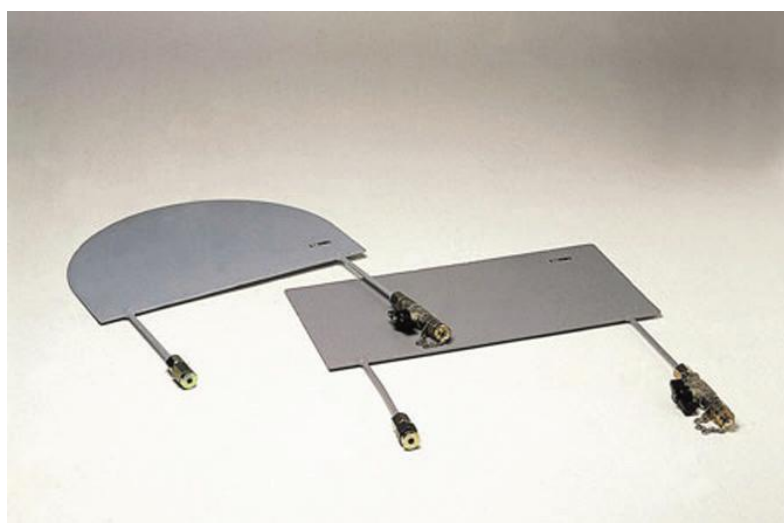


Fig.2.1 – Macacos Planos com diferente geometria [9]

A técnica de ensaios com macacos planos teve origem na área de Mecânica dos Solos. O investigador italiano *Paolo Rossi* adaptou o método para o uso em alvenaria no início da década de 80 e, desde então, vários estudos de investigação foram conduzidos com base neste procedimento. Nestas circunstâncias, para a avaliação de alvenarias com macacos planos foram desenvolvidas duas normas nos Estados Unidos pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e aprovadas em 1991, sendo estas as normas de ensaio ASTM C 1196-91, para o ensaio simples [1], e C 1197-91, para o ensaio duplo [2]. Na Europa, a prática destes ensaios segue as normas ASTM referidas anteriormente, e/ou as normas RILEM LUM.D.2 [3] e LUM.D.3 [4], para ensaios simples e duplos respectivamente.

O macaco plano pode ser fabricado com várias formas e tamanhos (Fig.2.2). A sua dimensão é factor condicionante no que respeita à técnica de preparação do rasgo. Os macacos planos com extremidades curvas (tipos c, d) são apropriados para encaixar em rasgos efectuados com serras circulares. Os macacos planos rectangulares (tipos a, b) são usados onde a argamassa dos rasgos tem de ser removida manualmente ou através de um equipamento de corte em perfuração.

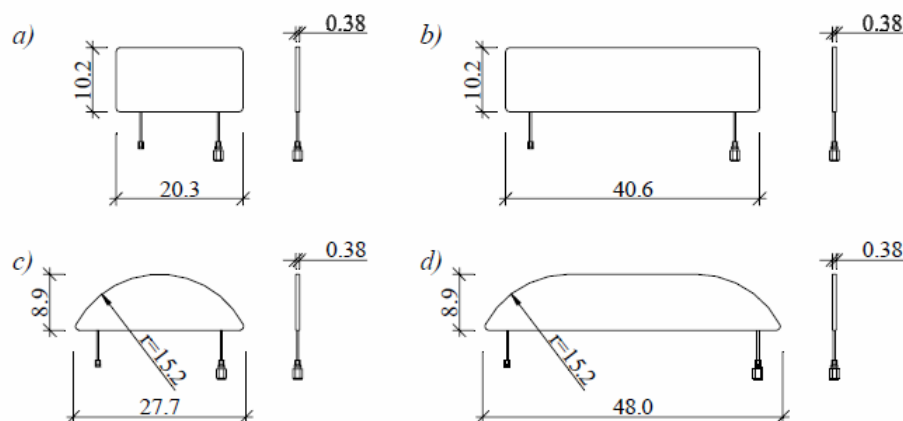


Fig.2.2 – Exemplos de Macacos Planos com diferentes dimensões [5]

Independentemente da forma do macaco plano, este deve encaixar “na perfeição” no rasgo. Um macaco plano ideal conseguirá preencher por completo o rasgo efectuado, mas em termos práticos, é necessário recorrer a chapas de aço juntamente com o macaco para completar a espessura do rasgo. Estas chapas (Fig.2.3) merecem especial atenção pois para além da função referida traduzem mais dois aspectos relevantes. O primeiro aspecto a ter em conta é o facto de a presença de chapas de espessura reduzida, e considerando que apresentam, em geral, um módulo de deformabilidade mais elevado do que os macacos, permitem que a distribuição de forças entre o macaco e a parede de alvenaria se realize com maior uniformidade (no entanto, pode ocorrer também uma perturbação da aplicação de carga). O segundo aspecto a considerar é o facto de que estas chapas, com a mesma dimensão dos macacos, podem, eventualmente, ser fabricadas com um braço de encaixe que facilita consideravelmente a remoção dos macacos planos após a sua utilização.

Mais informações relativamente a este tipo de equipamentos, para o uso em Ensaios de Macacos Planos, podem ser encontradas num estudo efectuado ao nível do núcleo de investigação da FEUP, no âmbito de tese de programa doutoral [8].



Fig.2.3 – Chapa de aço de espessura reduzida [8]

2.2. ENSAIO SIMPLES

O princípio do ensaio com macacos planos simples, em paredes de alvenaria, também conhecido como ensaio de compressão, baseia-se na eliminação local das tensões instaladas na parede, com a abertura de um rasgo horizontal, seguida pela compensação das tensões aliviadas através da pressurização controlada do macaco plano instalado no rasgo efectuado.



Fig.2.4 – Macaco Plano encaixado num rasgo de parede de Alvenaria de Pedra com a contribuição das chapas de espessura reduzida [10]

Previamente ao corte realiza-se o registo da distância entre pontos de referência, dispostos perpendicularmente, acima e abaixo, à orientação da ranhura a realizar. O campo de deslocamentos de referência é determinado pela medição das distâncias entre pontos de referência fixos na superfície da alvenaria (distâncias d_i na Fig.2.5). Em seguida, um rasgo é efectuado no plano normal à direcção dos deslocamentos a medir. O corte dos rasgos provoca o alívio parcial de tensões na alvenaria tanto acima como abaixo do entalhe e consequentemente a distância entre os pontos de referência diminui.

Depois, o macaco é introduzido no rasgo e é-lhe injectado óleo de modo a aplicar pressão na alvenaria, causando uma restituição gradual do campo de deslocamentos inicial, onde a certo ponto, alcançam aproximadamente as distâncias previamente medidas. A pressão necessária p_f alcançada nesta instância pode ser relacionada como a tensão de compressão na direcção normal ao rasgo.

A pressão hidráulica no macaco necessária para retomar o estado inicial é mais elevada que a tensão real, fruto da rigidez inerente ao macaco, que resiste a expansões quando o macaco é pressurizado e da diferença entre a área do macaco e a área do rasgo efectuado (sendo esta última maior). Ambos estes factores foram tidos em conta no cálculo e interpretação dos resultados obtidos na presente dissertação.

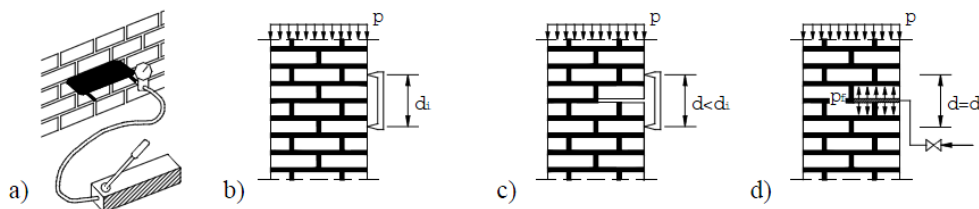


Fig.2.5 – Ensaio Simples de Macacos Planos. [5]

Este ensaio, tal como descrito anteriormente, tem base nas seguintes considerações [1]:

- o estado de tensão local é de compressão uniforme;
- a alvenaria à volta do rasgo é homogénea;
- a alvenaria deforma-se simetricamente em relação ao rasgo;
- a tensão aplicada pelos macacos à alvenaria é uniforme;
- a alvenaria deve estar em regime elástico, isto é, os valores de tensão estimados devem, quando comparados com os da resistência à compressão, assegurar que a alvenaria está em regime elástico.

Na Fig.2.6 é possível observar um esquema representativo das diferentes fases do ensaio, em especial da relação entre a evolução das pressões no macaco e dos deslocamentos medidos:

- (a) medição das distâncias entre pontos de referência;
- (b) corte e aproximação dos pontos por descompressão local;
- (c) Aplicação de carga pelo macaco plano;
- (d) Reposição do estado de deformação inicial.

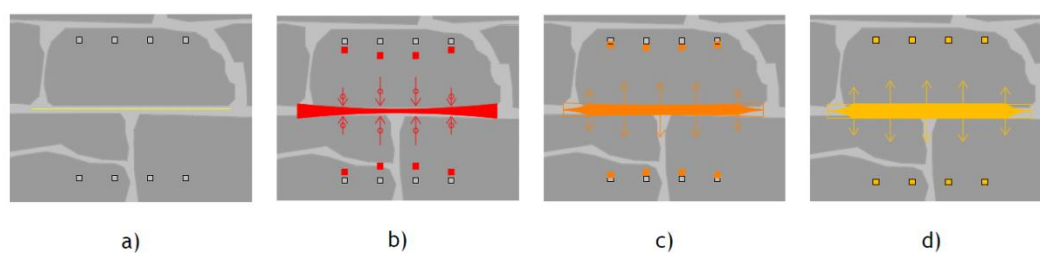


Fig.2.6 – Ensaio Simples de Macacos Planos. [8]

2.3. ENSAIO DUPLO

O princípio do ensaio duplo, também conhecido como ensaio de deformabilidade, é similar ao ensaio de compressão padrão. A diferença encontra-se no facto de ser realizado *in situ* em que 2 macacos planos são utilizados para aplicar a carga na parede. Uma configuração típica de um ensaio de deformabilidade é apresentada na figura 2.7.

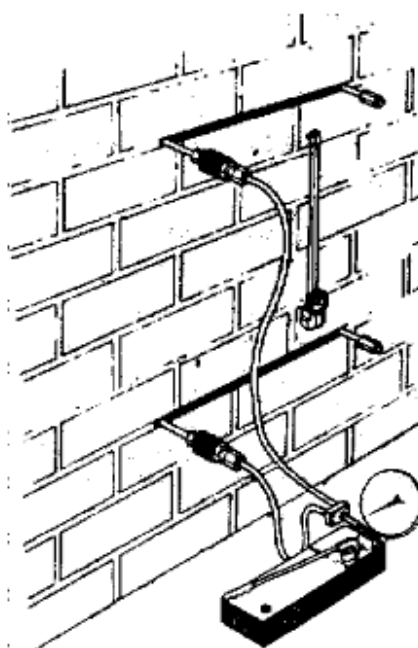


Fig.2.7 – Ensaio Duplo de Macacos Planos. [5]

Ao cortar dois rasgos paralelos, parte da parede fica “destacada” da alvenaria envolvente formando uma “amostra” (Fig.2.8). Esta alvenaria situada entre os rasgos é assumida com tensão nula. Os macacos são então introduzidos, e as distâncias iniciais entre os pontos de referência são verificadas. Ao pressurizar os macacos, a carga é aplicada à “amostra” criando um estado de tensão de compressão aproximadamente uniaxial.

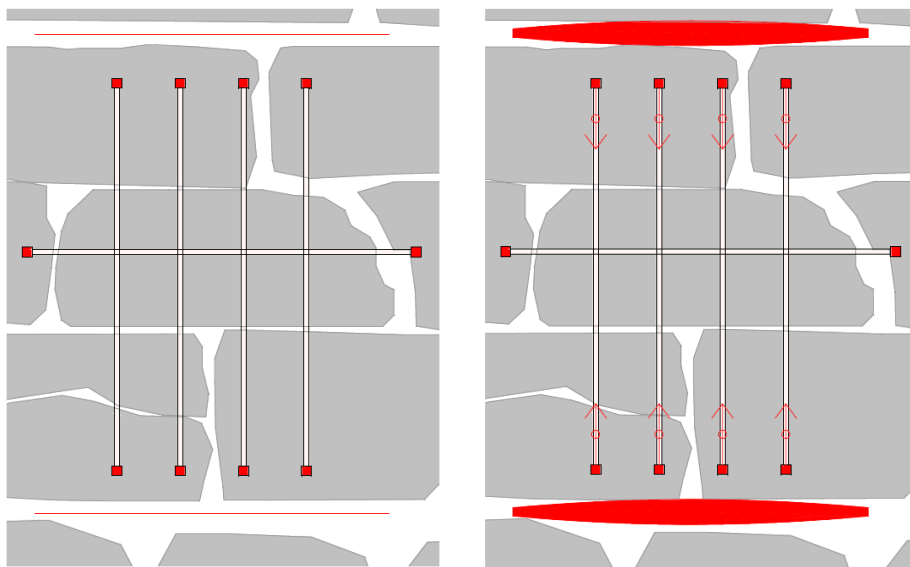


Fig.2.8 – Ensaio Duplo com posição inicial de referência e incremento de pressão em simultâneo nos dois macacos. [8]

Com um aumento da pressão nos macacos, a distância inicial entre os pontos de referência diminui e a relação Tensão/Extensão pode assim ser determinada. O valor do módulo de Young (módulo de deformabilidade) pode ser calculado através da curva experimental Tensão/Extensão. Durante o ensaio, o diagrama Força/Deslocamento é monitorizado e no momento em que se verificar uma mudança de inclinação acentuada por parte das curvas de deslocamento, a aplicação de carga dá-se por terminada.

O método do ensaio de deformabilidade é baseado nas seguintes considerações [2]:

- a alvenaria envolvente dos rasgos é homogênea;
- a tensão aplicada pelos macacos à alvenaria é uniforme e o estado de tensão na “amostra” é uniaxial (os efeitos de confinamento lateral são ignorados).

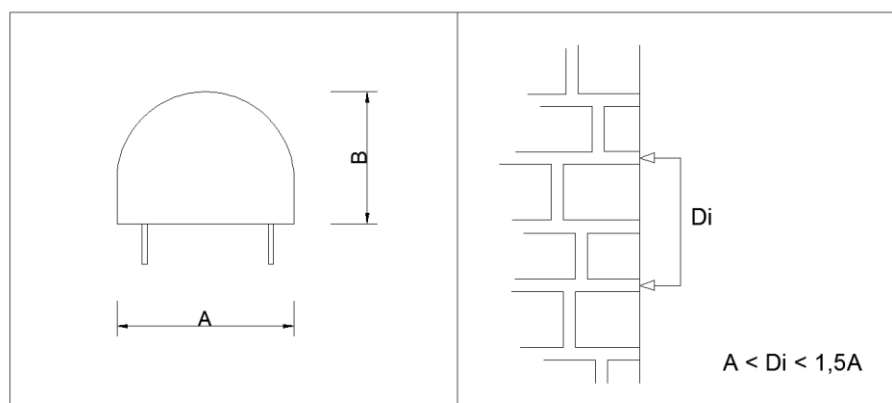


Fig.2.9 – Distância entre macacos no Ensaio Duplo.

É importante referir que a distância entre os macacos no ensaio duplo é definida pelas normas consoante a dimensão do macaco utilizado. Ambas as normas ASTM e RILEM baseiam-se no comprimento (A) e profundidade (B) do macaco para estabelecer esses limites. Sugerem que a distância D_i deva ser inferior a 1,5 vezes a dimensão A do macaco, mas a RILEM acrescenta um parâmetro que sugere que esta medida seja também inferior a 2,5 vezes a dimensão B do macaco. Mais adiante, na fase de modelação, será feita uma observação relativa a esta distância regulamentar e sua influência no presente trabalho.

2.4. METODOLOGIA DE CÁLCULO

2.4.1. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO (ENSAIO SIMPLES)

Tal como já foi dito, após inserção do macaco plano no corte, a pressão é gradualmente aumentada por níveis de carga com incremento constante, até que tenha sido eliminada a convergência medida anteriormente (Fig.2.5). Neste estágio, deve ser registado o valor da pressão (P) que repõe as condições iniciais da alvenaria. O valor da tensão instalada no local antes do corte (σ) é dado pela seguinte fórmula:

$$\sigma = K_m \times K_a \times P \quad (2.1)$$

em que:

K_m - Tem em conta as características geométricas do macaco e a rigidez do cordão de soldadura do macaco. Este parâmetro é determinado por meio de testes de calibração realizados pelo fabricante e é relatado no certificado de calibração.

K_a - Razão entre a área do macaco (A_m) e a área de corte (A_c).

P - Valor da pressão lida no macaco que repõe as condições iniciais da alvenaria.

2.4.2. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE (ENSAIO DUPLO)

A técnica utilizada permite determinar as características de deformabilidade de uma amostra, através da medição da convergência entre pares de pontos dispostos entre 2 rasgos (Fig.2.7)

Em cada local a ensaiar são inseridos dois macacos planos (com forma geométrica composta) em cortes previamente executados. Os macacos deverão ser ligados em paralelo à bomba de pressão, sendo então aplicada uma tensão uniaxial à amostra da parede localizada entre os macacos, reproduzindo condições do ensaio muito semelhantes às do ensaio uniaxial convencional.

O ensaio é realizado através de vários ciclos de carga/descarga, com o aumento/diminuição gradual dos níveis de tensão com incrementos constantes, sendo realizado em cada nível leituras das deformações do local ensaiado.

O valor do módulo de Young (módulo de elasticidade/deformabilidade) para cada intervalo de tensão (σ) pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

em que:

ε - Extensão correspondente à deformação medida nos LVDTs, e que pode ser calculada através da fórmula:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_f}{l_i} \quad (2.3)$$

em que:

l_i - Distância inicial entre as bases de medição.

l_f - Distância final entre as bases de medição.

É necessário corrigir as pressões lidas no manómetro tendo em conta os factores de correcção K_m e K_a já referidos anteriormente.

2.4.3. ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A estimativa da resistência à compressão pode ser efectuada aproveitando a disposição dos macacos para a determinação da deformabilidade. A carga aplicada à amostra pelos macacos planos é aumentada progressivamente através de ciclos de carga/descarga. A dada altura, através da monitorização dos diagramas de Força/Deslocamento, atinge-se o ponto em que é possível verificar uma mudança de inclinação acentuada nas curvas experimentais. Este ponto corresponde ao momento em que o material começa a fissurar, apresentando os primeiros danos. Alguns autores indicam este ponto como representativo de uma tensão instalada, próximo dos 70% de tensão última resistente do material nas condições da amostra.

2.5. OBSERVAÇÕES ÀS NORMAS

Para efectuar os ensaios em questão, tendo como base as instruções das normas, é necessário seguir uma série de procedimentos que já foram aqui sumariamente introduzidos. Contudo, podem surgir dificuldades na realização dos ensaios que condicionem a correcta aplicação das normas ou até mesmo a validade dos resultados.

As normas RILEM apresentam uma secção onde são previstos problemas inerentes às características da alvenaria, nomeadamente:

- juntas espessas;
- alvenaria regular com juntas delgadas;
- alvenaria de pedra irregular.

No caso das juntas de argamassa espessas refere-se que a escolha da posição de corte, para ambos os ensaios simples e duplos, torna-se complicada. Isto porque, com uma espessura significativa, a argamassa pode apresentar uma rigidez reduzida relativamente ao esperado neste tipo de ensaio. Por esta razão, e no caso de apresentarem mais do que 2cm de espessura, sugere-se que o corte seja efectuado parcialmente na pedra para evitar desvio de resultados.

Nas alvenarias com juntas delgadas, o problema prende-se com o facto de que a introdução de rasgos numa argamassa demasiado estreita, pode danificar as pedras envolventes. Visto que este tipo de ensaio é caracterizado como sendo não destrutivo, torna-se necessário aumentar a precisão do corte. Esta medida é sugerida na norma sob a forma de execução do rasgo através de uma serra em vez de uma perfuradora.

A alvenaria de pedra irregular é caracterizada por uma espessura de argamassa variável e pedras de dimensão variável também, tal como é exemplificado na Fig.2.10. Isto levanta o problema de não se conseguir cumprir a norma pelo facto de nos impossibilitar o corte dos rasgos sem afectar qualquer pedra. Esta condicionante pode impossibilitar a aplicação do ensaio no caso de se estar perante uma estrutura de valor patrimonial, onde o dano nas pedras tenha que ser evitado. De qualquer modo, a posição dos cortes deve ser estrategicamente escolhida de modo a corresponder a uma “amostra” de parede que traduza resultados válidos.



Fig.2.10 – Alvenaria de Pedra irregular.

Outra condicionante que se pode encontrar c alvenarias de pedra de dimensões consideráveis. Como já foi dito anteriormente, a distância entre macacos no ensaio duplo, deve integrar-se numa margem de valores que depende das dimensões dos macacos utilizados.

O facto de se ter pedras de grandes dimensões pode condicionar a aplicação da norma, no sentido em que nos vemos obrigados a ultrapassar o limite superior desta distância, com o intuito de posicionar os cortes no curso da argamassa, não provocando qualquer dano nas pedras e respeitando o número de camadas de pedras regulamentar. Por esta razão, muitos dos ensaios realizados em alvenarias de pedra não cumprem a norma no que respeita à distância entre macacos planos.

2.6. REFERÊNCIAS

- [1] ASTM (1991) - *In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements*, ASTM Standard C 1196-91, ASTM
- [2] ASTM (1991) - *In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method*, ASTM Standard C 1197-91, ASTM
- [3] RILEM (1990) - LUM.D.2, *In-situ stress tests on masonry based on the flat jack*, RILEM
- [4] RILEM (1990) - LUM.D.3, *In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack*, RILEM
- [5] Gregorczyk, P., Lourenço, P. (2000) - *A Review on Flat-Jack Testing*, Universidade do Minho.
- [6] Binda, L., Tiraboschi, C. (2001) - *FLAT-JACK TEST: A slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures*, Politecnico of Milano.
- [7] Costa, A., Guedes, J., Miranda, L. (2009) - *Síntese dos Ensaios Não Destrutivos, Edifícios da Rua António Carneiro*, Relatório de Doutoramento, FEUP
- [8] Miranda, L. (em Curso) - *Ensaios Não Destrutivos em Edifícios Antigos*, Dissertação de Doutoramento, FEUP
- [9] www.controls.it, Junho 2010
- [10] Costa, A., Guedes, J., Miranda, L., Oliveira, B. (2010) - *Caracterização de Paredes de Alvenaria de Pedra*, Ensaios Sónicos e de Macacos Planos, Relatório IC-FEUP

3

ENSAIO EXPERIMENTAL

3.1. GENERALIDADES

O presente estudo foi complementado por um ensaio experimental efectuado num edifício público na Região Norte de Portugal. Este ensaio teve como principal objectivo a caracterização de uma estrutura portante em alvenaria de pedra, utilizando técnicas Não e Medianamente Destrutivas, nomeadamente ensaios de propagação de ondas sónicas e ensaios com macacos planos. No presente estudo apenas se abordarão os procedimentos e resultados obtidos com o ensaio de macacos planos. Pretende-se neste capítulo complementar a informação registada no capítulo 2 com resultados reais de uma aplicação em que o autor teve a oportunidade de participar.

Na Figura 3.1, apresenta-se a parede testada com esta técnica, caracterizada por possuir reboco nas duas faces havendo por isso necessidade de retirar o reboco no troço a ensaiar e na face a operar.



Fig.3.1 – Parede testada com a técnica de macacos planos [1]

A remoção do reboco permitiu analisar o aparelho da parede e decidir quais os locais a considerar para colocação dos macacos planos. A furação prévia com um berbequim permitiu ainda estimar de forma expedita a espessura da alvenaria em 40cm, muito possivelmente de folha única.

3.2. PROCEDIMENTO

3.2.1. ENSAIO SIMPLES

A realização deste ensaio teve início com a colocação dos pontos de referência na parede, de modo a registar uma primeira leitura do campo de deformações inicial, medindo as distâncias (na vertical) entre 4 pares de pontos de referência que são marcados antes da realização do corte na parede. Em seguida executou-se um rasgo horizontal na parede com uma rebarbadora, onde foi introduzido o macaco plano ligado à bomba hidráulica, o que permitiu a injeção de óleo para o seu interior. A bomba hidráulica utilizada é dotada de um manómetro/célula de pressão, que indicava a pressão instalada no macaco plano em cada instante.

A execução do ensaio simples divide-se em duas etapas: a) medição da alteração do estado de deformação provocada pelo rasgo executado na parede para introdução do macaco plano e b) determinação da pressão a inserir no macaco para repor o estado de deformação inicial, ou seja, anterior à execução do rasgo. Esta pressão corresponde ao estado de tensão vertical a que a zona da parede ensaiada se encontrava sujeita antes do corte e cujo valor se pretendia identificar [1].

Após a realização do corte, mede-se a aproximação dos pontos de referência que resulta da descompressão do local. O macaco plano é então colocado no rasgo e é-lhe injectada pressão com o objectivo de repor as distâncias inicialmente medidas entre os pontos de referência. Esse processo é gradual e termina quando todas as distâncias forem repostas.

Repare-se que, as distâncias medidas nos 4 alinhamentos verticais não atingem o valor inicial em simultâneo, sendo que o valor da tensão instalada na secção de corte antes do rasgo corresponde à média das pressões que repõem as distâncias dos vários alinhamentos de referência. Na Fig.3.2 apresentam-se algumas imagens do ensaio simples realizado.



(a) Colocação dos pontos de referência;



(b) Realização do corte com rebarbadora;

Fig.3.2 – Ensaio Simples da parede de alvenaria de pedra [1]

3.2.2. ENSAIO DUPLO

Este ensaio é normalmente precedido pelo ensaio simples, pelo que, inicialmente, já se dispõe de um macaco plano inserido na parede. É então efectuado um segundo rasgo, geralmente acima do primeiro, onde é inserido o segundo macaco plano.

Os dois macacos foram ligados a uma bomba manual e desta forma foi garantida a mesma pressão em ambos. Entre os dois macacos planos foi colocado um conjunto de aparelhos de medição de deslocamento (LVDTs - Linear Variable Differential Transformers), 4 posicionados na vertical e 1 na horizontal.

Durante o ensaio duplo os macacos planos são pressurizados com óleo, sendo desta forma exercida pressão sobre o troço de parede que se localiza entre os macacos. Os carregamentos realizados são cíclicos (carga e descarga) e de pressão crescente.

Os valores de pressão e deformação obtidos são registados com o auxílio de um computador portátil ligado a um sistema de aquisição que permite a leitura simultânea dos valores dos deslocamentos medidos nos LVDTs da pressão registada na célula de pressão colocada no circuito de saída de óleo da bomba manual.

Os dados registados permitem traçar gráficos tensão vertical “versus” deformação vertical e horizontal.



(a) Abertura do segundo rasgo;



(b) Colocação dos macacos e dos LVDTs;

Fig.3.3 – Ensaio Duplo da parede de alvenaria de pedra [1]

3.3. RESULTADOS

3.3.1. ENSAIO SIMPLES

O Ensaio Simples permitiu obter o estado de tensão vertical instalado “in-situ” na zona de corte. Antes da realização do ensaio esse valor foi estimado em 360kPa. Nesta análise considerou-se uma massa volúmica para a alvenaria de 26kN/m^3 , uma altura até ao primeiro corte de 14m e desprezou-se a contribuição dos pavimentos.

Na Fig.3.4 representa-se a evolução relativa dos deslocamentos medidos nos alinhamentos verticais para alguns patamares de carga (pressão efectiva) exercida no macaco plano.

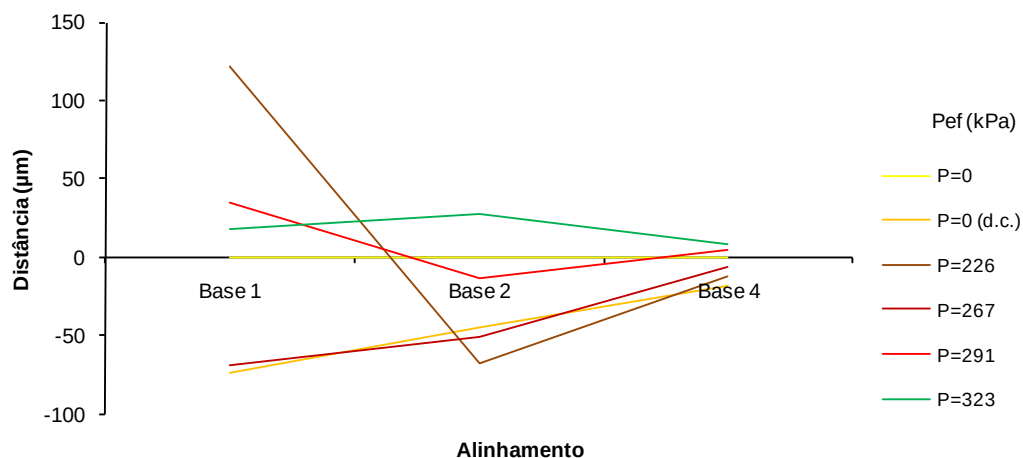


Fig.3.4 – Evolução dos deslocamentos por patamar de pressão [1]

A evolução dos deslocamentos com a carga aplicada permitiu identificar a tensão vertical instalada “in-situ” em 289kPa (valor próximo do estimado previamente, 360kPa). Na determinação da tensão foram utilizados os parâmetros: $k_a=0.76$ e $k_m=0.85$ (parâmetros descritos no capítulo anterior para cálculo da pressão instalada na parede).

Na Fig.3.5 apresenta-se a evolução dos deslocamentos (eixo vertical) de cada um dos alinhamentos verticais monitorizados, com a pressão (efectiva) exercida pelo macaco na parede (eixo horizontal).

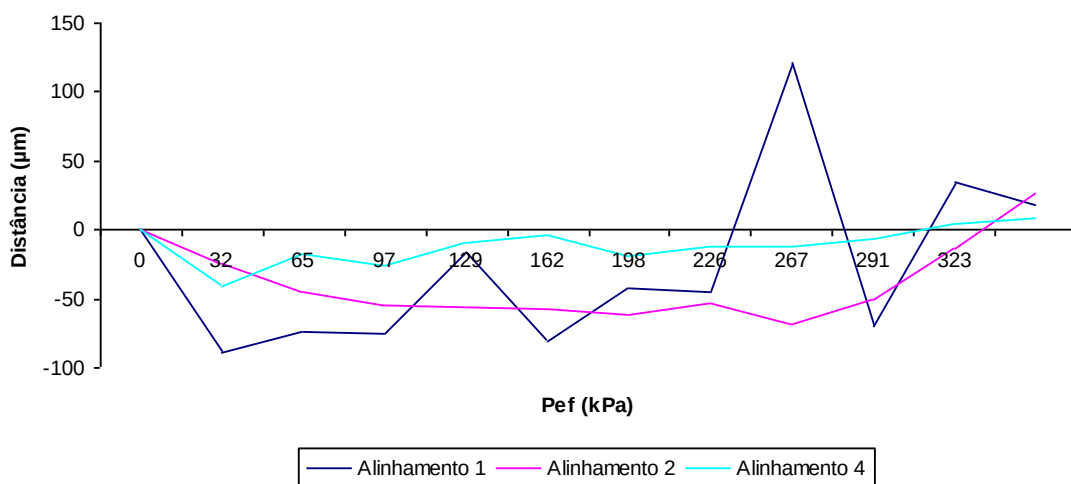


Fig.3.5 – Evolução dos deslocamentos em cada alinhamento [1]

3.3.2. ENSAIO DUPLO

O ensaio duplo permitiu avaliar o comportamento da alvenaria sob carga vertical. A Fig.3.6 identifica, esquematicamente, os LVDTs utilizados no ensaio.

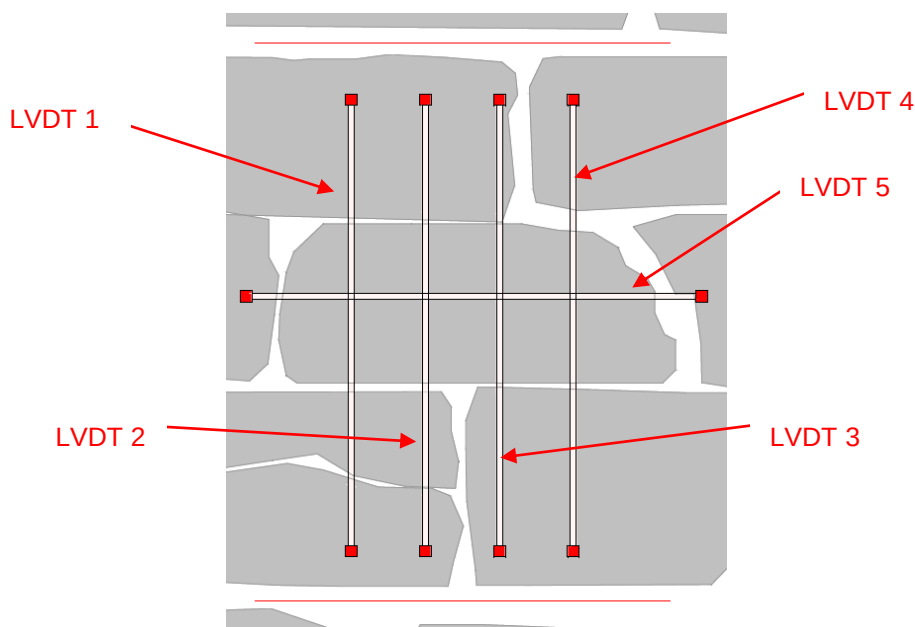


Fig.3.6 – Esquema da disposição dos LVDTs utilizados no ensaio [2]

Os resultados deste ensaio, apresentados na Fig.3.7, mostram que, como previsto, o LVDT 5 posicionado na horizontal registou alongamentos. Por outro lado, a evolução das deformações dos 4 LVDTs verticais foi bastante distinta: o LVDT4 apresentou deslocamentos muito maiores do que os restantes; numa fase inicial do ensaio, o LVDT3 indicou a existência de alongamentos em vez dos encurtamentos esperados. Isto poderá ser resultado da rotação das pedras entre macacos planos na fase inicial do ensaio.

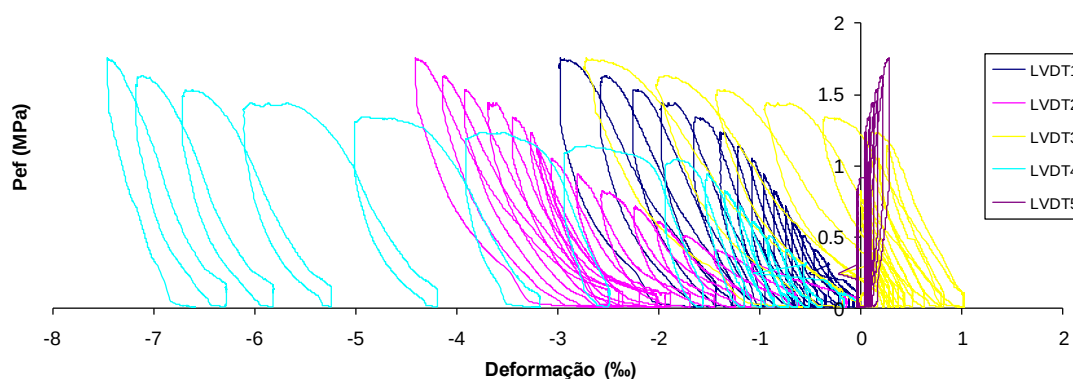


Fig.3.7 – Gráficos Tensão/Extensão do Ensaio Duplo [1]

3.4. CONCLUSÕES

Os ensaios com os macacos planos permitiram concluir tratar-se de uma alvenaria caracterizada por uma rigidez em ramo virgem, e nas condições do teste, variável entre 0,8GPa e 0,25GPa, relativo ao primeiro e ao segundo regime de deformação, respectivamente. Em relação aos valores de rigidez de descarga e recarga, obtiveram-se valores médios de 1.5GPa. As curvas obtidas mostram ainda que o material é extremamente plástico, exibindo uma capacidade diminuta de recuperação de deformação após descarga. A evolução da curva envolvente das tensões verticais versus deformações verticais, permite estimar, mas com uma incerteza associada elevada, uma capacidade resistente nas condições do ensaio de cerca de 2.0MPa.

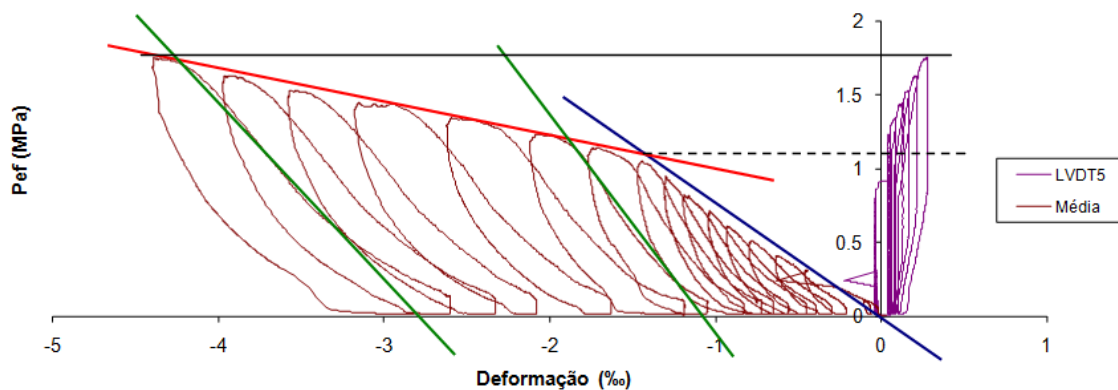


Fig.3.8 – Gráfico Tensão/Extensão média dos LVDTs verticais e do LVDT horizontal [1]

3.5. REFERÊNCIAS

- [1] Costa, A., Guedes, J., Miranda, L., Oliveira, B. (2010) - *Caracterização de Paredes de Alvenaria de Pedra*, Ensaio Sónicos e de Macacos Planos, Relatório IC-FEUP
- [2] Miranda, L. (em Curso) - *Ensaio Não Destrutivos em Edifícios Antigos*, Dissertação de Doutoramento, FEUP

4

MODELAÇÃO E GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

4.1. GENERALIDADES

A análise de uma estrutura, pressupõe sempre a prévia elaboração de um modelo capaz de reproduzir satisfatoriamente as reais condições da obra a construir ou construída, quer em termos da evidente precisão geométrica requerida, quer em termos das suas características materiais e condições de apoio.

Na modelação de sólidos, o advento dos computadores trouxe grandes avanços, dada a elevada capacidade de processamento dos computadores de que hoje dispomos e a permanente evolução dos programas de cálculo. De facto o avanço dos programas, acompanhado por uma crescente confiança nas análises numéricas, permitiu que se fossem abandonando os antigos modelos em escala física reduzida, em favor dos actuais modelos numéricos mais precisos e de obtenção mais rápida.

Assim, o processo de modelação de uma parede de alvenaria de pedra passa inicialmente pela sua definição geométrica com vista à geração da malha de elementos finitos.

Estão hoje disponíveis no mercado, inúmeros programas de CAD (*Computer Aided Design*), que permitem a geração da geometria com grande nível de precisão, bem como programas de análise estrutural e cuja interactividade confere grande versatilidade a todo o processo de modelação, cabendo apenas ao projectista seleccionar a sua estratégia de acordo com as ferramentas que melhor domina.

Para esta modelação foi utilizado o programa *AutoCAD 2010* da Autodesk para desenhar a geometria da parede com o pormenor dos rasgos. Foi utilizado ainda o software *GID 9.0.6* da CIMNE para geração da malha de elementos finitos e transformação do ficheiro da malha num ficheiro que fosse legível pelo código de programação e análise do software *Cast3M*, utilizado no âmbito deste trabalho.

4.2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

4.2.1. GENERALIDADES

O Método de Elementos Finitos (MEF) surge em meados do séc. XX, numa estratégia de resposta aos mais complexos problemas de análise estrutural. Apesar de inovador, o método apresentava-se como impraticável no caso de análises mais complexas uma vez que a resolução de grandes sistemas de equações tornava a sua aplicação inviável. Só com o apoio dos computadores foi possível a exploração das reais capacidades do MEF tendo este tido, a partir de então, uma evolução exponencial e consequentemente uma grande aceitação até aos dias de hoje.

A evolução dos meios informáticos, permitiu que se fossem desenvolvendo programas de cálculo cada vez mais avançados não só em termos de capacidades de processamento mas também ao nível das interfaces gráficas, tal como na modelação de sólidos, que têm vindo a tornar-se cada vez mais intuitivas. Este factor contribuiu decisivamente para a proliferação da aplicação do método, sendo este largamente utilizado não só com fins de investigação mas também pela generalidade dos projectistas.

No domínio da análise estrutural, o MEF tem como objectivo a determinação e análise do estado de deformação e tensão de uma determinada estrutura sujeita a acções exteriores. A sua característica principal é a divisão do meio contínuo inicial em vários subdomínios de dimensão finita e com as mesmas características materiais do meio inicial, os elementos. De facto, as primeiras abordagens ao método propostas, apesar de diferentes, partilhavam este aspecto essencial, isto é, todas implicavam uma discretização do meio inicial através de uma assemblagem de elementos constituindo uma malha. Assim o meio contínuo inicial é modelado como um sistema discreto composto por um número finito de elementos que interagem entre si através de um número finito de nós.

4.2.1. TIPO DE ELEMENTO

Um dos factores que influencia bastante os resultados, bem como o dispêndio de tempo gasto no processamento, é a escolha do tipo de elemento a usar. Na Fig.4.1 apresentam-se alguns dos elementos finitos mais comuns.

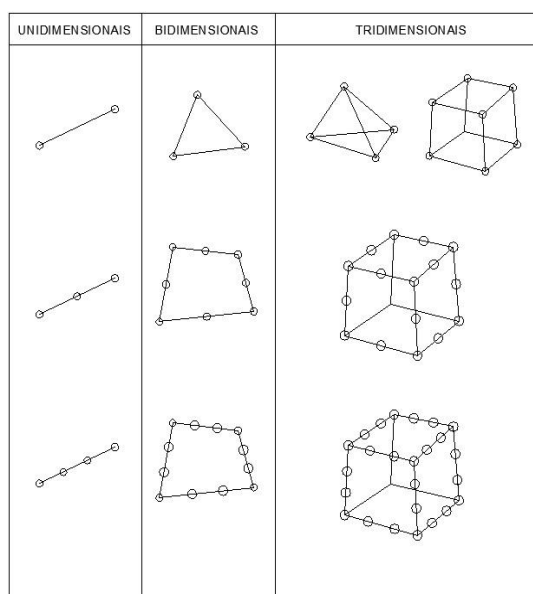


Fig.4.1 – Elementos Finitos mais comuns [2].

Os actuais programas de cálculo estão equipados com completas bibliotecas de elementos finitos devendo o projectista seleccionar criteriosamente o elemento a utilizar em função do tipo de análise a efectuar e respectiva precisão bem como das propriedades do próprio elemento, nomeadamente o número de nós e correspondentes graus de liberdade e comportamento do elemento.

Focando a atenção no presente estudo, foi necessário definir o elemento finito a usar, escolha que foi condicionada pelo uso de protocolos e rotinas previamente preparadas para o âmbito de investigação. As rotinas com os procedimentos para modelação 3D estão apenas definidas para o uso do elemento finito tridimensional Hexaedro de 8 nós, na sua formulação isoparamétrica.

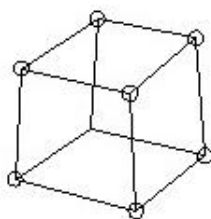


Fig.4.2 – Elemento Finito Tridimensional Hexaedro de 8 nós.

O elemento em estudo caracteriza-se pela sua forma hexaédrica, contando com 8 nós localizados nos vértices (Fig.4.2). Os graus de liberdade consideram-se, como habitualmente, concentrados nos nós e possuem três componentes, a saber: translação segundo x , segundo y e segundo z (u_x , u_y , u_z), num total de 24 graus de liberdade. A formulação isoparamétrica pressupõe a existência de dois sistemas de eixos, um correspondente ao referencial geral (x, y, z) e o segundo relativo ao referencial local (ξ, η, ζ) e cujo domínio se encontra definido no intervalo $[-1, 1]$ em qualquer uma das direcções. A vantagem deste tipo de formulação reside no facto de transformar um domínio irregular arbitrário num domínio regular pertencente ao intervalo referido. A mais-valia que se retira desta forma de proceder está relacionada com a maior simplicidade na integração do domínio.

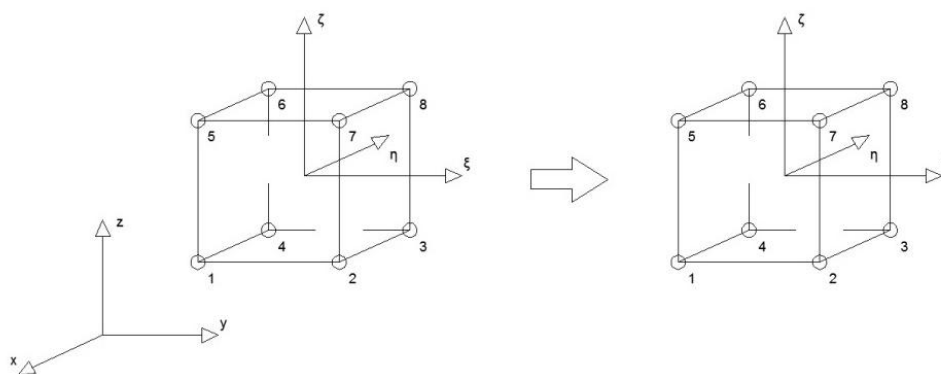


Fig.4.3 – Formulação isoparamétrica do elemento Hexaedro de 8 nós.

4.3. MODELAÇÃO DA MALHA

4.3.1. GEOMETRIA DA PAREDE

Para definir a parede a utilizar foi necessário delinear a estratégia e prever as condicionantes que seriam encontradas na fase de processamento de dados. Para este tipo de análise optou-se por assumir o material da parede como sendo homogêneo, não discretizando o material da argamassa e da pedra. O resultado é um só material que reúne as características conjuntas dos dois materiais de modo a comportar-se à imagem da estrutura com a sua composição de pedras sobrepostas e envolvidas pela argamassa.

Optou-se assim por atribuir as dimensões de 3 metros de largura por 3 metros de altura e 40 centímetros de espessura, à parede que servirá como base da modelação. Como poderá ser constatado mais à frente, para outros casos de estudo ter-se-á em conta uma espessura de 60cm, para avaliar a influência desta dimensão no comportamento da estrutura sob carregamento dos macacos planos.

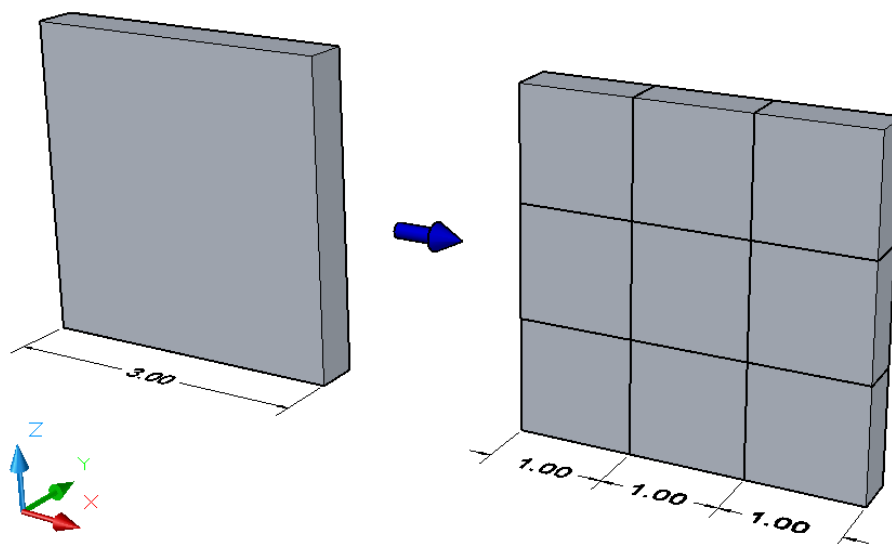


Fig.4.4. – Dimensões da Parede Base (3.0x3.0x0.40m).

Para a parede base, representada na Fig.4.4, pode verificar-se a subdivisão em blocos de dimensões de 1 metro por 1 metro. Isto acontece para facilitar a transferência dos dados da malha para o software de análise. Durante várias tentativas e iterações foi-se revelando útil subdividir o modelo em blocos separados para gerar malhas de elementos finitos mais leves e que pudessem ser posteriormente agrupadas formando a malha final pretendida.

As zonas dos rasgos que permitem simular o Ensaio de Macacos Planos serão adaptadas no Bloco Central da Parede Base. Esta modelação específica dos rasgos como entalhes na Parede Base virão a revelar-se decisivos para a modelação final, isto porque serão zonas onde não constarão quaisquer elementos finitos, serão zonas de vazio que condicionarão toda a modelação da estrutura.

4.3.2. MODELAÇÃO DOS RASGOS NO BLOCO CENTRAL

Uma das primeiras condicionantes que se previa era o facto de existir uma zona central na parede contemplada com os rasgos dos macacos planos. Isto não seria uma condicionante de peso, não fosse pelo facto de que para se obter resultados em conformidade com a maioria dos estudos desenvolvidos pelo núcleo de investigação da FEUP, seria necessário traduzir a zona dos rasgos com um corte circular como pode ser visto na Fig.4.5.

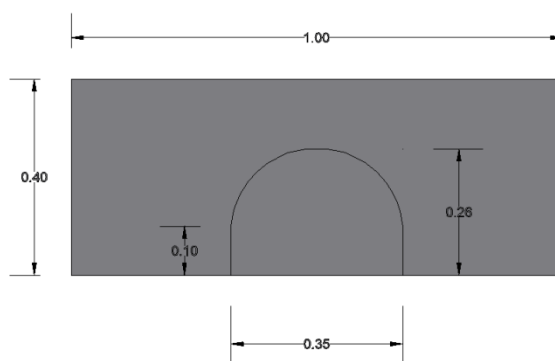


Fig.4.5. – Dimensões dos Rasgos no Bloco Central em metros.



Fig.4.6. – Localização dos Rasgos no Bloco Central em metros.

Tendo como referência o macaco plano circular, representa-se na Fig.4.6. a localização dos rasgos no Bloco Central. A distância entre rasgos, tal como foi referido no Capítulo 2, é função da dimensão A do macaco que é igual a 35cm. Ora, $1,5 \times A$ resulta em 52,5cm, pelo que se adoptou a medida de 50cm para o afastamento vertical entre rasgos. Esta medida é retirada dos respectivos eixos médios das espessuras dos rasgos.

A dificuldade que se revela nesta instância resulta no contorno circular que o rasgo apresenta, porque o elemento hexaédrico que se prevê utilizar para definição da malha de elementos finitos, devidamente apresentado no capítulo anterior, trouxe imensos problemas de configuração no momento de geração da malha (Fig.4.7).

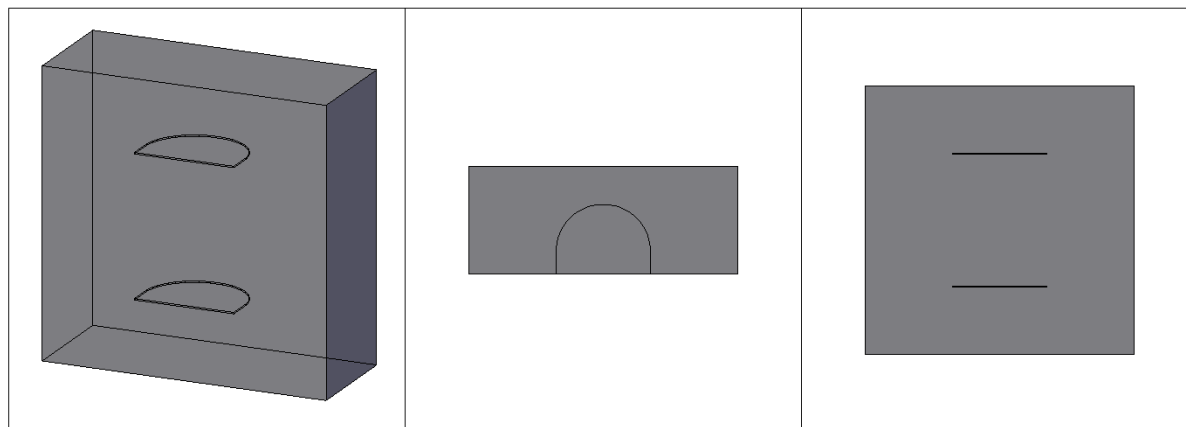


Fig.4.7. – Modelação 001 do Bloco Central.

Desta feita, revelou-se necessário subdividir a zona dos rasgos em blocos separados (Fig.4.8) de modo a adaptar os vários elementos hexaédricos que viriam a dar forma à malha pretendida. De referir que a delimitação circular do rasgo foi substituída por sucessivos troços rectos de modo a acomodar os hexaedros. Outra nota a realçar reside na espessura do rasgo de 5mm que seria considerada, conduzindo assim a uma “lâmina” em bloco rectangular que definiria as zonas do rasgo no plano. Esta medida de 5mm foi ponderada a partir da espessura real do macaco plano de 4,2mm.

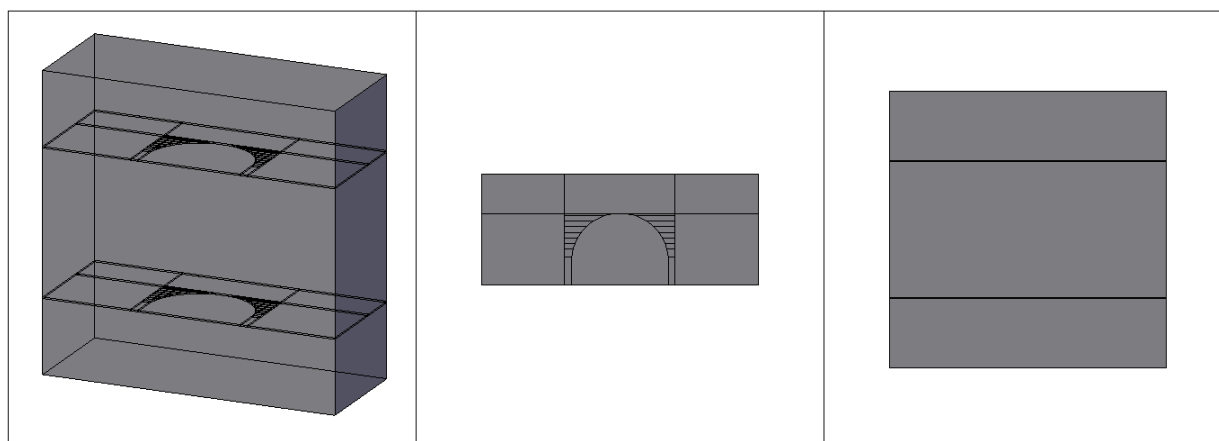


Fig.4.8. – Modelação 002 do Bloco Central.

Esta estruturação de blocos na zona dos rasgos efectuou-se numa fase em que se ponderava utilizar o software GID para dividir os blocos em vários elementos finitos. Um primeiro problema seria encontrado ao nível dos nós que não batiam certo nas respectivas ligações entre elementos. Por esta razão adoptou-se outra geometria da lâmina da zona do rasgo (Fig.4.9). De referir que, nesta nova modelação, se consideraram troços rectos para definir o contorno circular de modo a facilitar a divisão em vários elementos.

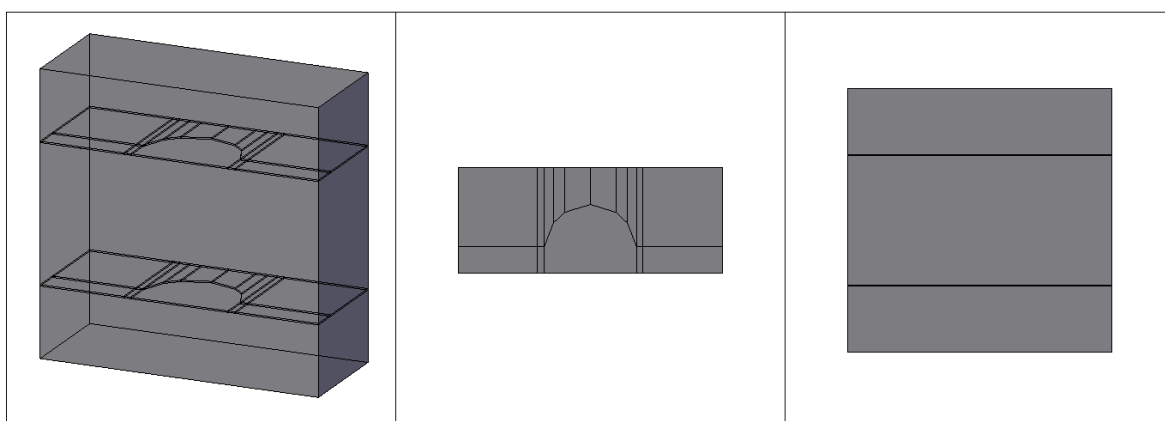


Fig.4.9. – Modelação 003 do Bloco Central.

Ao utilizar o programa GID percebeu-se as condicionantes geradas pelo facto de se ter blocos de dimensão considerável colados às lâminas dos rasgos. Os erros na geração da malha sucediam-se pelo simples facto de não se conseguir unir em conformidade os vários nós dos elementos, independentemente da escala ou número de elementos utilizados. Este facto levou a que fosse considerada uma subdivisão dos restantes blocos com a mesma configuração das lâminas dos rasgos de modo a que todas as ligações coincidisse (Fig.4.10).

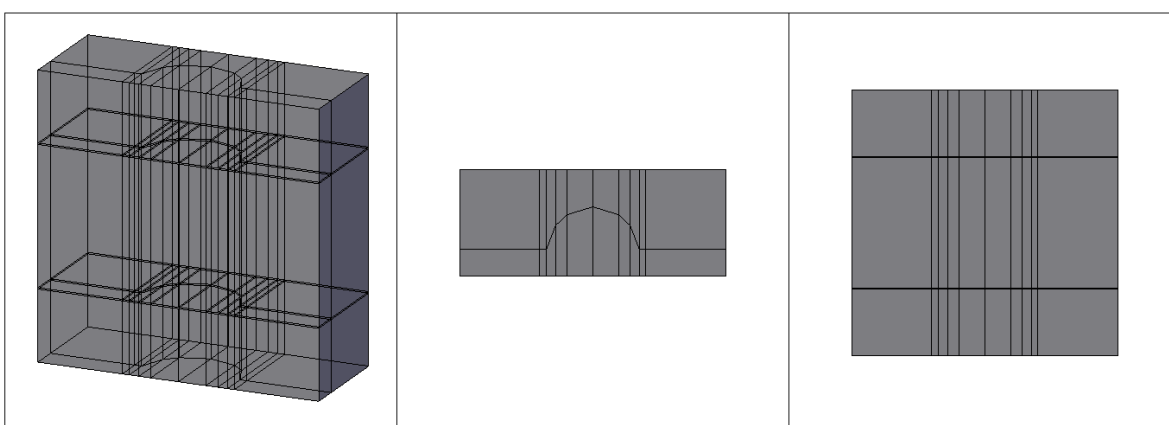


Fig.4.10. – Modelação 004 do Bloco Central.

Neste ponto da modelação seria possível gerar uma malha de elementos finitos consoante o número de subdivisões que se pretendia por elemento. Este processo foi realizado no GID, como referido anteriormente, que permite subdividir os volumes considerados na modelação em vários elementos finitos.

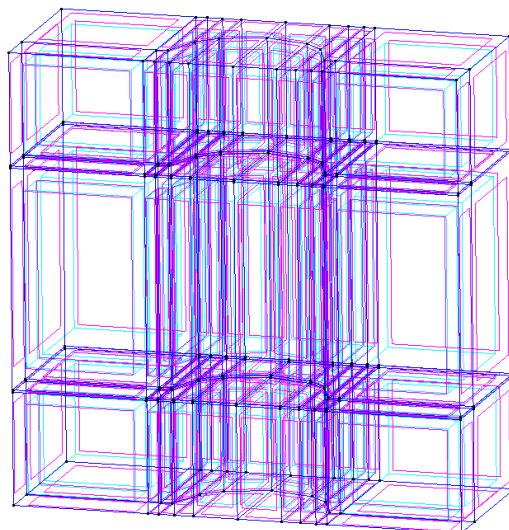


Fig.4.11. – Processamento dos volumes do Bloco Central no GID.

Após o processamento no programa GID (Fig.4.11), e respectiva subdivisão de cada volume em 4 elementos por direcção, o resultado é uma malha com maior refinamento na zona entre os rasgos (Fig.4.12).

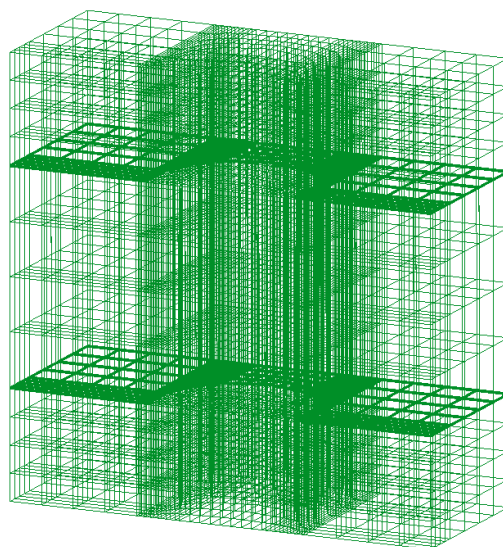


Fig.4.12. – Malha refinada do Bloco Central no GID.

Mas apesar de o GID traduzir em boas condições a malha pretendida, e apesar do nível de refinamento ser o desejado, outros problemas surgiram, problemas estes que aconteceram no processamento da malha no software de análise Cast3M.

Tal como referido no início do capítulo, para a geração da malha no programa Cast3M, utiliza-se um protocolo em forma de código que transforma os nós, linhas, faces, volumes nos elementos hexaédricos que formam a malha. O problema deste procedimento, tal como se viria a constatar, é que o código apresenta limitações no que se refere às dimensões relativas de cada elemento. Por exemplo, se um elemento tem dimensões de 1cm de largura por 1cm de profundidade e 5cm de altura ele apresentará um erro de geração do próprio elemento. O problema que aqui se pretende representar é o facto de este procedimento ser limitado no que se refere à relação entre a sua maior e menor dimensão, não se conseguindo assim traduzir devidamente o elemento como sendo um hexaedro.

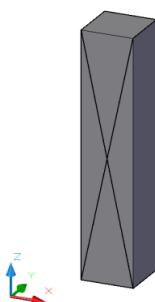


Fig.4.13. – Erro de geração do elemento hexaédrico no Cast3M.

Como é possível verificar na Fig.4.13, o erro gerado ao nível do elemento consistia numa subdivisão em elementos prismáticos numa aproximação ao formato tetraédrico. O que resulta daqui é uma má distribuição de esforços ao longo do próprio elemento e, por sua vez, ao longo da malha também, facto que seria comprovado após uma primeira análise com esta configuração.

Por este motivo, foi necessário traçar uma nova estratégia de modelação. Após várias iterações percebeu-se que o limite de relação menor/menor dimensão se encontrava entre 1:3 e 1:4. Logo estabeleceu-se como limite a relação 1:3 entre as dimensões de cada elemento. Por este motivo a modelação da zona do rasgo viria a sofrer várias alterações pelo que se optou nesta fase por começar do zero, desenhando em planta uma malha que respeitasse esta nova configuração. Este novo traçado da malha resultou na malha representada na Fig.4.14.

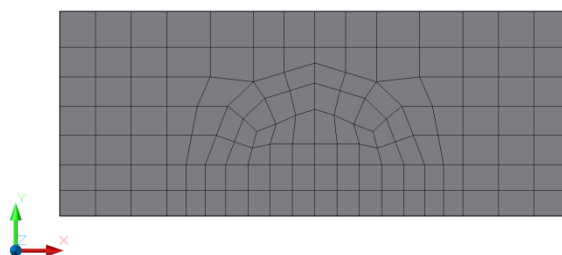


Fig.4.14. – Nova formulação da malha na zona dos rasgos.

Neste ponto é importante referir que com esta nova abordagem, se verificou a necessidade de aumentar a espessura dos rasgos, caso contrário, o referido limite de relação levaria à modelação de uma malha muito pesada com imensos elementos finitos. Assim, adoptou-se uma nova estratégia também para a modelação das zonas de extremidade dos rasgos (Fig.4.15) libertando assim a “lâmina” da zona do rasgo, permitindo um maior equilíbrio de dimensões na malha do Bloco Central. De referir também que o aumento de espessura do rasgo de 5mm para 20mm não introduziu diferenças significativas na simulação do ensaio, visto que com esta configuração o comportamento de abertura dos rasgos se aproximava bastante do comportamento real do rasgo quando se encontrava sob aplicação de carga através do macaco plano.



Fig.4.15. – Nova formulação da abertura do rasgo no Bloco Central.

Assim sendo, apresenta-se o Bloco Central com a modelação final pretendida na Fig.4.16. Como foi referido anteriormente, numa primeira instância, ponderou-se utilizar o GID para efectuar a divisão dos volumes desenhados no CAD nos respectivos elementos finitos, medida que não viria a ser tomada pela simples razão de, ao obedecer-se ao limite de relação condicionado pela zona dos rasgos (como já se demonstrou) obteve-se uma malha no próprio CAD de elementos finitos com dimensões bastante satisfatórias. Por esta razão utilizou-se o GID apenas para transformar esses volumes em hexaedros, sem quaisquer subdivisões ao nível de cada volume, e para transformar a malha num ficheiro legível pelo Cast3M.

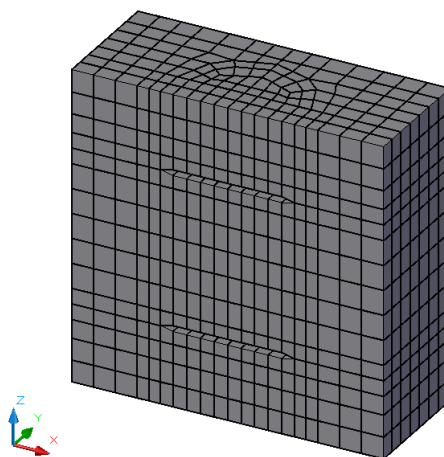


Fig.4.16. – Modelação final do Bloco Central.

4.3.3. PAREDE BASE

Os restantes blocos da parede base foram modelados sem grandes dificuldades, visto não haver mais rasgos a contemplar. Assim sendo, houve apenas cuidado em fazer coincidir todos os nós das extremidades dos blocos na modelação CAD, pelo facto já referido de que não se iria submeter o modelo a qualquer posterior subdivisão de elementos no GID.

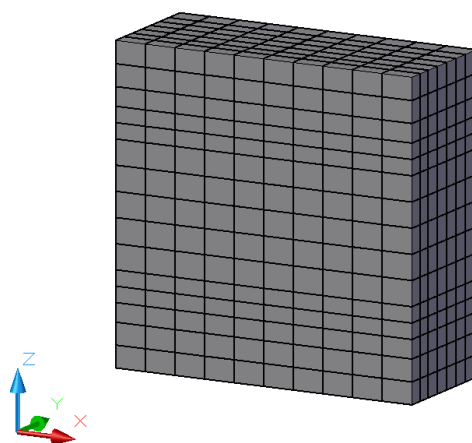


Fig.4.17. – Modelação final de um dos Blocos Laterais da Parede.

Um exemplo de um dos restantes blocos é o caso da Fig.4.17 em que podemos ver a modelação final de um dos Blocos laterais da Parede Base. Ao juntarmos todos os blocos e omitindo a subdivisão em elementos finitos, ficamos com a Parede Base definida por blocos 1,0x1,0x0,4 metros, com a particularidade do Bloco Central levar os dois rasgos que caracterizam o ensaio de macacos planos (Fig.4.18).

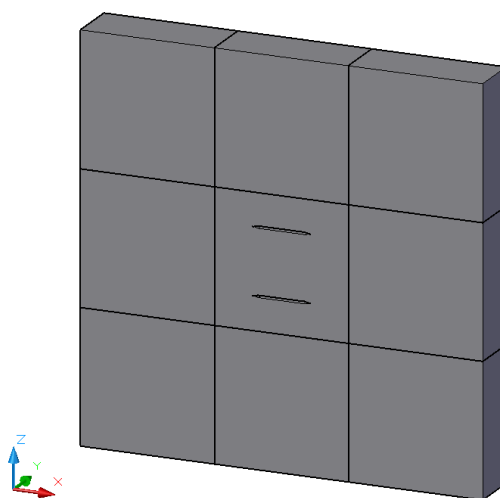


Fig.4.18. – Modelação final da Parede Base.

4.3.4. CONDIÇÃO DE SIMETRIA

Tal como já foi referido a estrutura em causa apresenta simetria segundo um plano vertical (Fig.4.19). Caracterizado pelo plano YZ, que atravessa a parede a meio dos rasgos, a condição simétrica torna-se muito útil por duas razões. A primeira razão explica-se pelo facto de reduzir a modelação em qualquer um dos casos para metade, facilitando assim a geração da malha por acumulação dos diferentes blocos no Cast3M. A segunda razão prende-se pelo facto de se ter uma malha mais reduzida para processar, diminuindo o tempo de cálculo. Isto consegue-se atribuindo uma condição de deslocamento nulo segundo X a todos os nós situados no plano em questão.

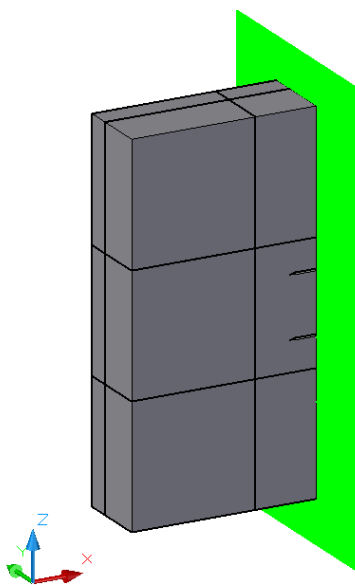


Fig.4.19. – Condição de Simetria da Parede.

4.3.5. CASOS DE ESTUDO

Para melhor perceber o efeito da acção dos Macacos Planos na resposta estrutural da parede, definiram-se 6 casos correspondentes a diferentes malhas expandidas em relação ao Caso Base. Foram assim definidos os casos:

- Caso 1 – Parede Base
- Caso 2 – Parede Base com Blocos Laterais
- Caso 3 – Parede Base com Blocos Superiores
- Caso 4 – Parede Base com Blocos Laterais e Superiores
- Caso 5 – Parede Base com Blocos Posteriores
- Caso 6 – Parede Base com Blocos Superiores e Posteriores

É importante referir que, à excepção de algumas repetições e condições de simetria, os blocos têm divisão em número de elementos distinta. Isto não afecta em nada a modelação ou geração da malha, apenas requer uma classificação cuidada e referenciada de cada bloco, para que os volumes encaixem uns nos outros permitindo uma correcta ligação entre os nós dos elementos. Note-se também que todos os casos revelam a condição simétrica referida anteriormente. Nas Figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, e 4.25 apresentam-se os diferentes casos de estudo simplificados por simetria.

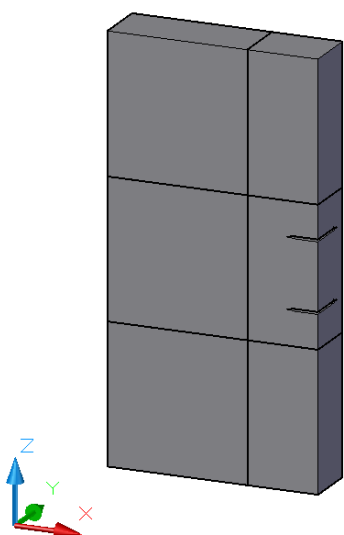


Fig.4.20 – Caso 1 (Parede Base)

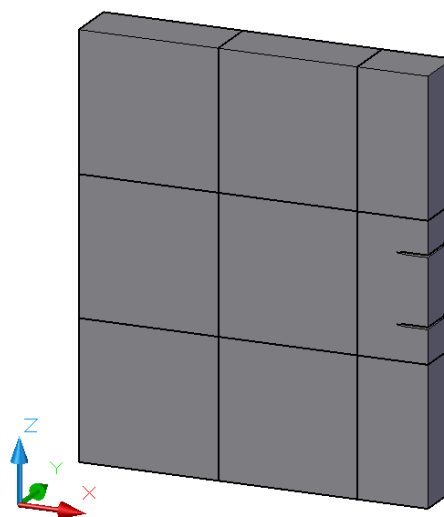


Fig.4.21 – Caso 2 (com Blocos Laterais)

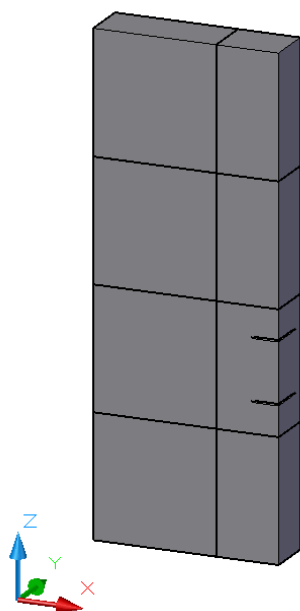


Fig.4.22 – Caso 3 (com Blocos Superiores)

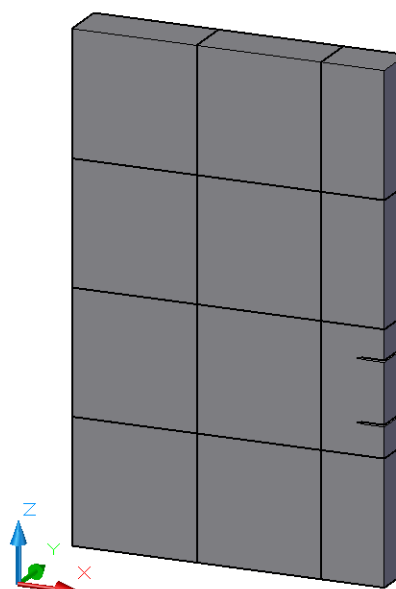


Fig.4.23 – Caso 4 (com Blocos Laterais e Superiores)

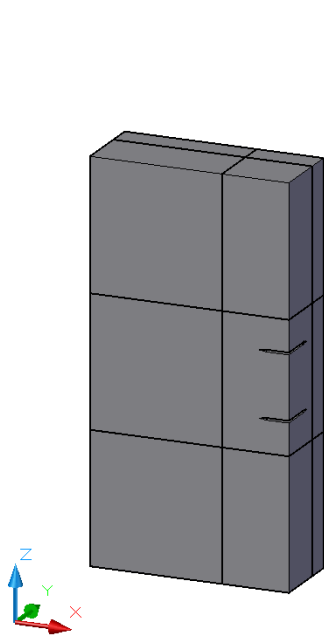


Fig.4.24 – Caso 5 (com Blocos Posteriores)

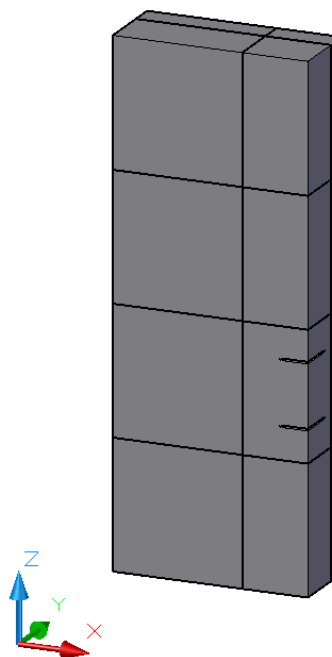


Fig.4.25 – Caso 6 (com Blocos Superiores e Posteriores)

No anexo A deste documento, na Fig.A.1 e no Quadro A.1, é possível encontrar a numeração de todos os blocos, bem como o nº de elementos finitos por bloco, respectivamente.

4.4. GERAÇÃO DA MALHA

Após a modelação dos blocos e definição dos casos de estudo, passou-se à fase de geração da malha no Cast3M. Para isso, procedeu-se, tal como já referido, à transformação dos ficheiros dos vários blocos no GID em ficheiros DGIBI, formato necessário para correr os blocos no Cast3M. Tal como referido no início do capítulo, é através de procedimentos e protocolos previamente utilizados, para outras modelações testadas e aprovadas na área de investigação, que este software traduz a malha recebida numa malha gerada pelo próprio Cast3M. O resultado apresenta-se na Fig.4.27 e Fig.4.28 onde é possível observar alguns traços que induzem alguma transparência no modelo, mas que não passam de flutuações na representação gráfica do próprio software.

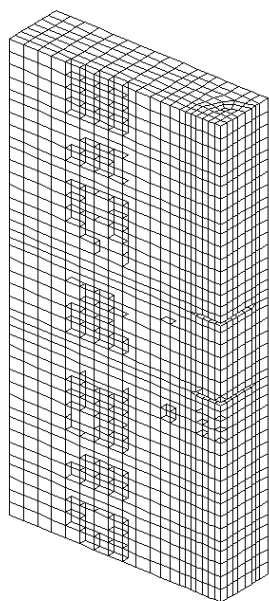


Fig.4.26 – Parede Base no Cast3M

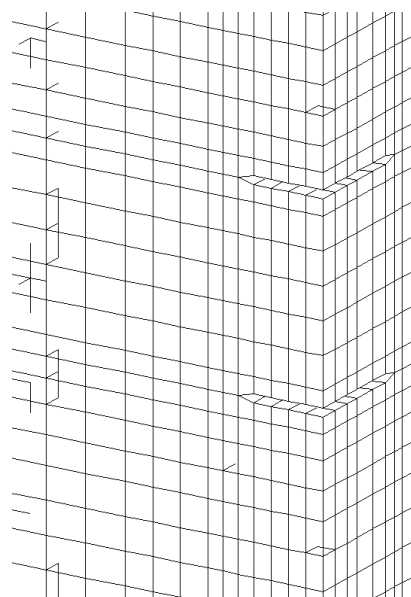


Fig.4.27 – Pormenor dos Rasgos no Cast3M

4.5. REFERÊNCIAS

- [1] Ribó, R., Riera, M. (2000) - *GiD The Personal Pre and Postprocessor*, User Manual Version 9, CIMNE.
- [2] Buchet, P., Capéran, P., Pegon, P. (2000) - *Visual Cast3m for Windows NT*, User Manual, Joint Research Centre

5

CARACTERIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

5.1. GENERALIDADES

Na modelação e análise estrutural, a correcta atribuição das condições de apoio e caracterização das acções envolvidas, constitui um passo de extrema importância para se obter resultados que se aproximem o máximo possível das reais condições estruturais. Ora, tendo em conta que o objectivo do presente trabalho passa por simular numericamente o Ensaio Duplo de Macacos Planos para diferentes casos estruturais, torna-se necessário arbitrar correctamente as condições de apoio e acções, tendo em vista uma análise dos vários casos em condições semelhantes. Por esta razão, neste capítulo serão apresentadas as condições de análise assumidas para o estudo da parede.

As condições de apoio serão resumidas ao apoio da parede na base, atribuição de uma condição isostática e definição da condição de simetria da parede em estudo. As acções a considerar serão essencialmente o peso próprio da estrutura, a força aplicada no topo da parede e as forças dos macacos planos nos rasgos. Serão efectuados dois tipos de análise à estrutura: uma análise linear elástica e uma análise não-linear do comportamento material. A análise não-linear em questão teve como base um modelo de comportamento não-linear (Modelo de Dano Contínuo) que será introduzido mais à frente, na secção 5.5, através da sua definição e da calibração utilizada para este trabalho.

Nesse contexto, e nas próximas secções, serão devidamente caracterizadas as condições de apoio e as acções aplicadas à estrutura.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO

5.2.1. CONDIÇÃO DE SUPORTE

Tendo presente as condições de suporte que caracterizam este tipo de elemento, utilizou-se o plano inferior da parede (Fig.5.1) para bloquear a estrutura segundo a direcção vertical (eixo Z). Esta condição por si só, não garante o equilíbrio da estrutura, considerando que serão aplicadas forças externas, razão pela qual se irá atribuir uma condição isostática à parede.

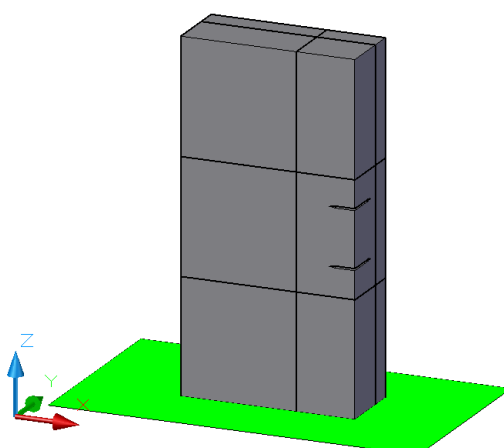


Fig.5.1. – Condição de suporte da Parede

5.2.2. CONDIÇÃO ISOSTÁTICA

A análise da estrutura será efectuada através da aplicação de tensões na parede, que se irão distribuir por toda a sua dimensão nos diferentes casos. Posto isto, é importante providenciar uma condição isostática à parede em estudo. Esta imposição é caracterizada na Fig.5.2, onde se bloqueiam os deslocamentos do nó P1 (segundo X e Y) e do nó P2 (segundo Y).

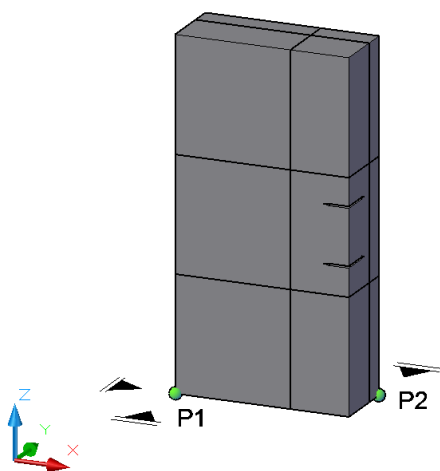


Fig.5.2. – Condição Isostática da Parede

5.2.3. CONDIÇÃO DE SIMETRIA

Tal como já foi referido, a análise da estrutura será feita apenas para meia parede para efeitos de simplificação de cálculo, beneficiando-se assim da sua simetria. Para isso, impôs-se o travamento segundo X dos deslocamentos de todos os nós da malha situados no plano YZ (com $X=2,5\text{m}$) que traduz esta simetria, tal como apresentado na Fig.5.3.

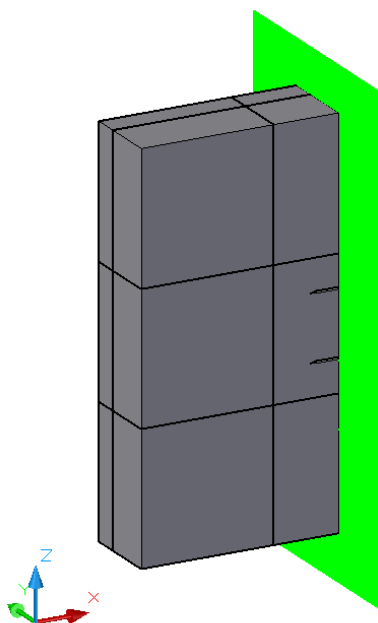


Fig.5.3. – Condição de simetria da Parede

5.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ACÇÕES

5.3.1. PESO PRÓPRIO (PP)

O peso próprio da parede foi considerado através da massa volúmica de uma alvenaria ($\rho = 2100 \text{ Kg/m}^3$), tendo em conta que este material apresenta características homogéneas, na modelação em questão. Esta acção provoca a deformação, se bem que muito reduzida, da zona dos rasgos o que de certa forma simula o fenómeno real de deformação por corte na parede referido no capítulo 2.

5.3.2. FORÇA APLICADA NO TOPO DA PAREDE (FT)

A força aplicada no topo da parede tem como objectivo simular o peso de pisos superiores que se poderão eventualmente encontrar neste tipo de estrutura e que devem ser respectivamente considerados nesta análise. Para o efeito, considerou-se uma camada suplementar de malha no topo da parede com 8cm de espessura que, através do seu peso próprio provoca uma força distribuída de 70KN ou 140KN (conforme o caso desenvolvido adiante) no plano XY do topo da parede. Esta imposição de força podia ter sido aplicada directamente no plano do topo da parede sob uma função do programa Cast3m que permite reproduzir uma força distribuída, num dado plano, por todos os nós pertencentes à malha. O problema desta medida encontrava-se na má distribuição das forças pelos nós, pois o que esta função efectua é uma divisão da força introduzida equitativamente pelos nós encontrados. Ora, como os nós têm diferentes áreas de influência, optou-se por aplicar esta acção sob forma de peso dos elementos, de modo a obter uma melhor distribuição das tensões (Fig.5.4).

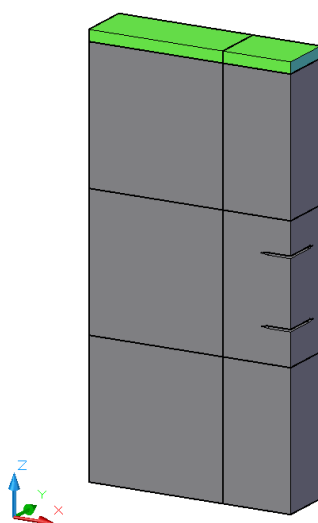


Fig.5.4. – Aplicação da força FT na parede

5.3.3. FORÇAS APLICADAS NOS RASGOS (FM)

Neste ponto definiu-se a força a aplicar nos rasgos da parede de modo a simular o ensaio de macacos planos. Pela mesma razão referida no ponto anterior, relativamente à aplicação de uma força distribuída segundo um plano, e pelo facto de esta força específica merecer algum cuidado na forma como seria introduzida, adoptou-se uma estratégia diferente.

Começou-se por identificar todos os pontos das faces horizontais dos rasgos, respectivamente situados às cotas $Z=1,76\text{m}$, $Z=1,74\text{m}$, $Z=1,26\text{m}$ e $Z=1,24\text{m}$ (Fig.5.5).

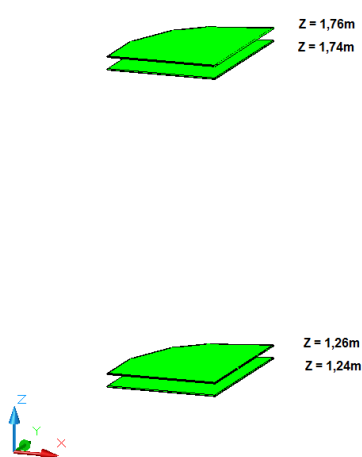


Fig.5.5. – Planos das faces horizontais dos rasgos

As forças dos nós são caracterizadas pela sua direcção vertical, mas com sentidos diferentes. Os nós situados nos planos às cotas $Z=1,76\text{m}$ e $Z=1,26\text{m}$ apresentam forças positivas, com sentido ascendente, enquanto os nós dos planos às cotas $Z=1,74\text{m}$ e $Z=1,24\text{m}$ apresentam forças negativas, com sentido descendente, tal como esquematizado na Fig.5.6.

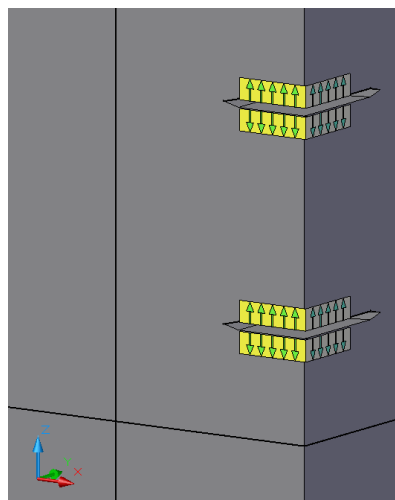


Fig.5.6. – Sentidos das forças FM nos rasgos

De seguida traçaram-se as linhas intermédias entre pontos do plano do rasgo. A partir destas linhas foi possível identificar as diferentes áreas de influência pertencentes a cada nó do plano. (Fig.5.7).

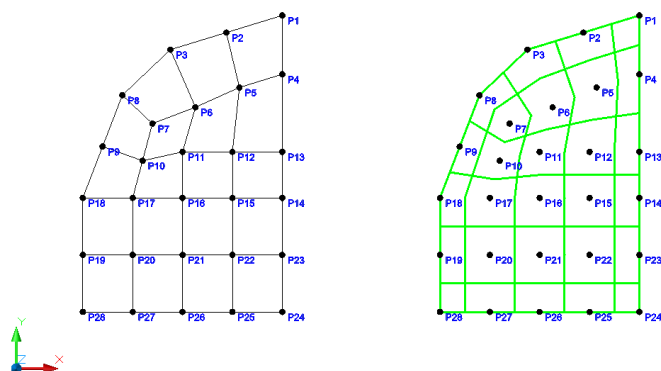


Fig.5.7. – Numeração dos nós e respectivas áreas de influência

No Quadro 5.1, traduzem-se as áreas de influência de cada ponto, bem como a percentagem associada a cada valor. Também se apresenta a força final distribuída para cada nó do plano, considerando uma força total de 70KN.

Quadro 5.1. – Distribuição da Força FM nos nós dos rasgos.

	X (m)	Y (m)	Área (m ²)	Área (%)	Força (KN)
P1	2,5000	1,2600	0,0006	1,58	1,1053
P2	2,4509	1,2450	0,0012	3,16	2,2105
P3	2,4018	1,2300	0,0013	3,42	2,3947
P4	2,5000	1,2084	0,0012	3,16	2,2105
P5	2,4624	1,1969	0,0022	5,79	4,0526
P6	2,4238	1,1795	0,0019	5,00	3,5000
P7	2,3861	1,1652	0,0010	2,63	1,8421
P8	2,3596	1,1900	0,0009	2,37	1,6579
P9	2,3423	1,1450	0,0008	2,11	1,4737
P10	2,3774	1,1326	0,0013	3,42	2,3947
P11	2,4125	1,1404	0,0016	4,21	2,9474
P12	2,4563	1,1404	0,0021	5,53	3,8684
P13	2,5000	1,1404	0,0011	2,89	2,0263
P14	2,5000	1,1000	0,0010	2,63	1,8421
P15	2,4563	1,1000	0,0020	5,26	3,6842
P16	2,4125	1,1000	0,0019	5,00	3,5000
P17	2,3687	1,1000	0,0018	4,74	3,3158
P18	2,3250	1,1000	0,0010	2,63	1,8421
P19	2,3250	1,0500	0,0011	2,89	2,0263
P20	2,3687	1,0500	0,0022	5,79	4,0526
P21	2,4125	1,0500	0,0022	5,79	4,0526
P22	2,4563	1,0500	0,0022	5,79	4,0526
P23	2,5000	1,0500	0,0011	2,89	2,0263
P24	2,5000	1,0000	0,0005	1,32	0,9211
P25	2,4563	1,0000	0,0011	2,89	2,0263
P26	2,4125	1,0000	0,0011	2,89	2,0263
P27	2,3687	1,0000	0,0011	2,89	2,0263
P28	2,3250	1,0000	0,0005	1,32	0,9211
TOTAL			0,0380	100,00	70,0000

Com esta medida foi possível distribuir a força pretendida de 70KN pelos vários nós de cada plano dos rasgos, introduzindo assim uma força uniformemente distribuída e com um efeito mais aproximado da acção teoricamente provocada pelos macacos planos.

5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO

5.4.1. MODELO DE COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO

Para a análise linear elástica do modelo numérico na rotina do Cast3m, serão apenas considerados os parâmetros descritos no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Parâmetros para a Análise Linear Elástica

Propriedades Mecânicas	
Peso Específico (γ)	2100 Kg/m ³
Módulo de Deformabilidade (E)	0,33 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,2

No que diz respeito às características do material da parede, convém salientar mais uma vez que o material foi considerado como isotrópico e homogêneo em todo o seu domínio.

5.4.2. MODELO DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR

O modelo constitutivo utilizado no presente trabalho para a análise não-linear material foi desenvolvida por (Faria 1994) e baseia-se na Mecânica do Dano Contínuo. Este método foi originalmente desenvolvido com o objectivo de reproduzir o comportamento não-linear de grandes massas de betão, mas considera-se que o modelo tem um campo de aplicação mais vasto.

Um exemplo de aplicação do Modelo de Dano Contínuo a estruturas de alvenaria de pedra pode ser encontrado em (Silva 2008).

O modelo em questão incorpora duas variáveis escalares independentes, sendo uma para tracção (d^+) e outra para compressão (d^-), que traduzem a evolução do dano no material. Estas variáveis assumem valores entre 0 e 1, correspondendo, respectivamente, a estado virgem e estado de colapso. Esta evolução é caracterizada pela diminuição da área resistente efectiva ($\bar{S}$), tal como se demonstra na Figura 5.8.

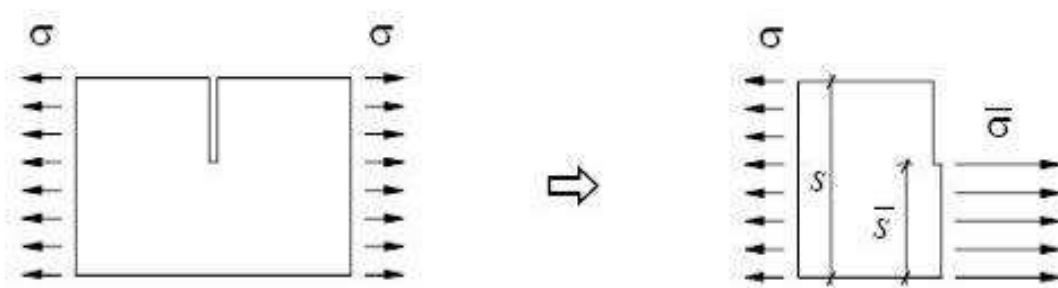


Fig.5.8. – Representação do conceito de área resistente efectiva [1]

A evolução do dano nas duas variáveis escalares é dada por funções monótonas crescentes que traduzem a degradação irreversível do material [3] (5.1).

$$0 \leq (d^+, d^-) \leq 1 \quad (5.1)$$

Ligado ao conceito de dano, surge então o conceito de tensão efectiva, podendo ser dividido nas componentes de tracção ($\bar{\sigma}^+$) e compressão ($\bar{\sigma}^-$) (5.2).

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^- \quad (5.2)$$

A equação (5.2) torna-se facilmente perceptível quando se consideram ensaios uniaxiais de tracção ou compressão onde uma das componentes é nula [2].

Ensaio de tracção uniaxial:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ = (1 - d^+) \cdot E \cdot \varepsilon \quad (5.3)$$

Ensaio de compressão uniaxial:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ = (1 - d^+) \cdot E \cdot (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (5.4)$$

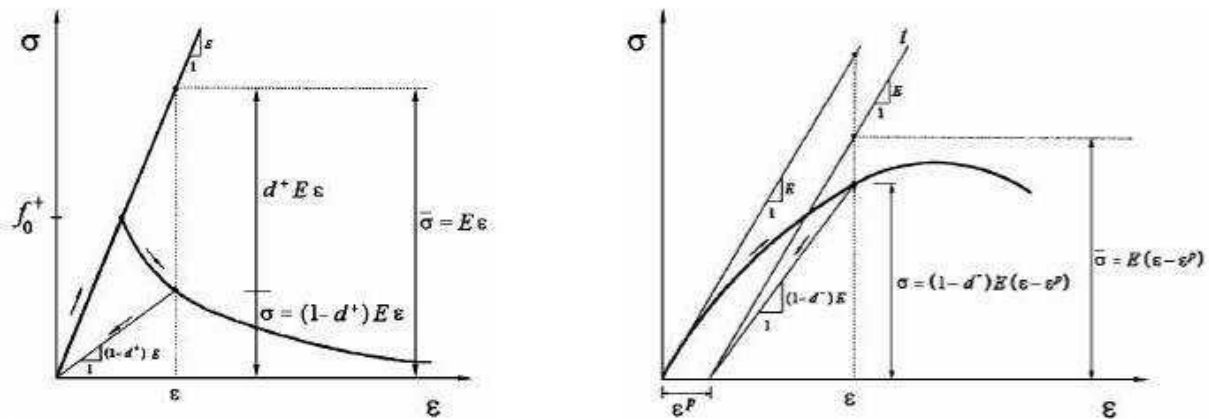


Fig.5.9. – Comportamento uniaxial do material, segundo o Modelo de Dano [1]

Da análise da Figura 5.9 e das equações (5.3) e (5.4) é possível concluir que o Modelo de Dano Contínuo não considera plasticidade em tracção, sendo as descargas dirigidas para a origem, ao contrário do comportamento em compressão, onde as descargas não são dirigidas para a origem, apresentando extensão plástica ε^p nula [3].

Para a aplicação deste modelo numérico é assumida a hipótese de que, nas condições iniciais, o material usado na simulação é isotrópico e homogéneo.

O modelo de dano contínuo aqui descrito encontra-se implementado no programa de cálculo Cast3M (Costa, 2004) e depende dos parâmetros definidos no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Parâmetros do Modelo de Dano Contínuo no Cast3m [4]

PARÂMETROS	DEFINIÇÃO
EXTP	Extensão de referência para o parâmetro plástico
STRP	Tensão de referência para o parâmetro plástico
EXT1 EXT2	Extensão de dois pontos de ajuste pertencentes à curva material
STR1 STR2	Tensões correspondentes aos pontos de ajuste
YOUN	Módulo de elasticidade
NU	Coefficiente de Poisson
RHO	Peso volúmico
NCRI	Critério de amaciamento em tracção
FTU1	Tensão de tracção de pico
REDC	Factor de redução para a tracção de pico
FC01	Tensão de compressão limite elástica
RT45	Rácio de compressão equi-biaxial
EXTU	Extensão última
FCU1	Tensão de compressão de pico
HLEN	Comprimento efectivo
GVAL	Energia de fractura

A calibração da lei de comportamento de um modelo, com base em ensaios experimentais, constitui uma importante fase no processo de simulação numérica de uma estrutura. No presente trabalho, foi utilizado um estudo de calibração efectuado em paredes de alvenaria de pedra no âmbito de um programa doutoral na FEUP [5]. Este estudo foi desenvolvido para caracterização mecânica de uma parede de alvenaria de pedra (referenciada como PP2), recolhida de um edifício da cidade do Porto e transportada para o Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE), para fins experimentais (Fig.5.10). O ensaio da alvenaria foi iniciado com a aplicação de dois ciclos de carga/descarga sobre a parede, tendo em vista a determinação do módulo de elasticidade no estado original.



Fig.5.10. – Parede de Alvenaria de Pedra PP2 [6]

Com base nos resultados do referido ensaio experimental calibrou-se a lei de comportamento pretendida para a simulação numérica.

Na Figura 5.11, apresenta-se a curva de comportamento para esforços de compressão axial adoptada.

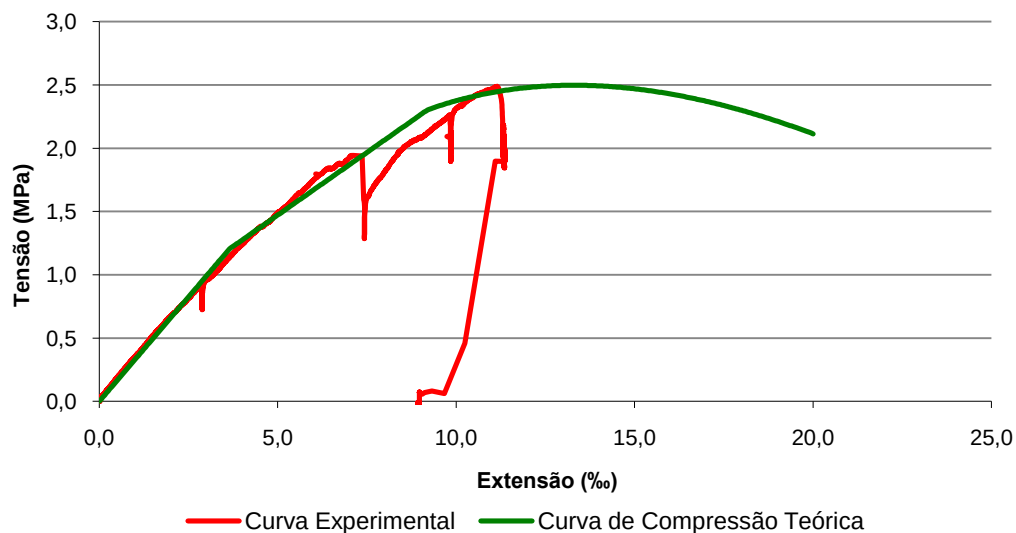


Fig.5.11. – Lei de Comportamento em Compressão [6]

Na Figura 5.12, apresenta-se a curva de comportamento em tracção adoptada. Note-se que o valor de tracção máximo teórico é 0,13MPa.

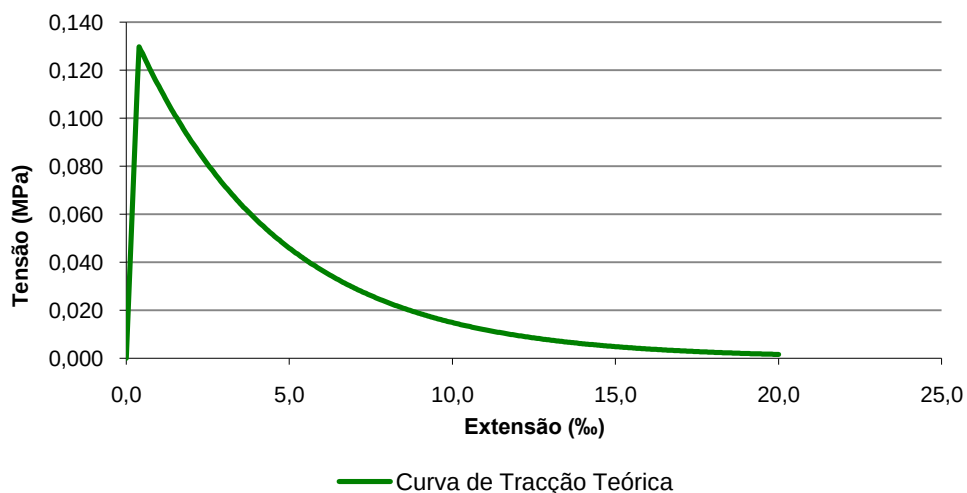


Fig.5.12. – Lei de Comportamento em Tracção [6]

No Quadro 5.4, apresentam-se os parâmetros assumidos na rotina do Cast3m, para o comportamento não-linear, obtidos a partir das curvas teóricas apresentadas anteriormente.

Quadro 5.4 – Valores assumidos para os parâmetros no Cast3m

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
EXTP	-0,0180	-
STRP	-2,30	MPa
EXT1	-0,0105	-
EXT2	-0,0180	-
STR1	-2,41	MPa
STR2	-2,30	MPa
YOUN	0,33	GPa
NU	0,20	-
RHO	2100,00	Kg/m ³
NCRI	1,00	-
FTU1	0,13	MPa
REDC	0,13	MPa
FC01	-1,20	MPa
RT45	1,00	-
EXTU	-0,0556	-
FCU1	2,50	MPa
HLEN	0,20	-
GVAL	120,18	J/m ²

Assim adoptou-se um material que reunisse as características do comportamento global de uma alvenaria de pedra, utilizando os resultados obtidos no ensaio de calibração referido na secção anterior.

Neste ponto, encontra-se reunida toda a informação necessária para dar início à análise do modelo numérico. Durante o próximo capítulo desenvolvem-se análises lineares elásticas para os casos principais apenas, enquanto o estudo do comportamento não-linear, através do modelo de dano contínuo descrito anteriormente, será avaliado e comparado para todos os casos de estudo.

5.5. REFERÊNCIAS

- [1] Faria, R. (1994) – *Avaliação do Comportamento Sísmico de Barragens de Betão através de um Modelo de Dano Contínuo*, Dissertação de Doutoramento, FEUP
- [2] Silva, B. (2008) – *Aplicação de um Modelo de Dano Contínuo na Modelação de Estruturas de Alvenaria de Pedra*, Dissertação de Mestrado, FEUP
- [3] Lopes, V. (2009) – *Identificação Mecânica e Avaliação do Comportamento Sísmico de Chaminés em Alvenaria*, Dissertação de Mestrado, FEUP
- [4] Costa, C. (2002) – *Análise do Comportamento da Ponte da Lagoncinha sob a Acção do Tráfego Rodoviário*, Dissertação de Mestrado, FEUP
- [5] Almeida, C. (2000) – *Análise do Comportamento da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sob a Acção dos Sismos*, Dissertação de Mestrado, FEUP
- [6] Almeida, C., Guedes, J., Arêde, A., Costa, A. (2010) – *Caracterização geométrica e mecânica de paredes em perpianho de granito*, Reabilitar 2010, FEUP

6

ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. GENERALIDADES

Uma vez obtido o modelo numérico, bem como determinadas as propriedades mecânicas do material envolvido e as respectivas condições da estrutura, cujos parâmetros ficaram definidos no capítulo anterior, ficam reunidas todas as condições necessárias para a realização do cálculo da estrutura e consequente análise de resultados.

Assim, o objectivo deste capítulo é, fundamentalmente, a obtenção e análise da resposta da estrutura segundo cada um dos cenários considerados, quando submetida às acções atrás referidas, nomeadamente ao nível do estado de tensão e de deformação induzidos por essas acções. Para cada um dos casos de estudo serão efectuadas as considerações devidas que se justificam.

É importante referir que, devido ao elevado número de quadros e gráficos de resultados, alguns destes elementos são apresentados no anexo A deste documento, mantendo nesta secção apenas os que se consideraram de maior relevância no que respeita à interpretação e apresentação das análises efectuadas.

No decorrer deste capítulo serão apresentadas as seguintes análises:

Quadro 6.1 – Casos de Estudo

CASOS DE ESTUDO	TIPO DE ANÁLISE	FORÇAS APLICADAS (KN)		MODELO DA PAREDE
		FT	FM	
CASO BASE	LINEAR / NÃO-LINEAR	70	70	BASE
CASO DAS PLACAS RÍGIDAS	LINEAR / NÃO-LINEAR	70	70	BASE
CASO FT = 140KN	NÃO-LINEAR	140	70	BASE
CASO 2	NÃO-LINEAR	140	70	CASO 2
CASO 3	NÃO-LINEAR	140	70	CASO 3
CASO 4	NÃO-LINEAR	140	70	CASO 4
CASO 5	NÃO-LINEAR	140	70	CASO 5
CASO 6	NÃO-LINEAR	140	70	CASO 6
CASO FT = 280KN	NÃO-LINEAR	280	140	BASE

Nos 2 primeiros casos, Caso Base e Caso das Placas Rígidas, serão consideradas análises comparativas entre os respectivos comportamentos linear elástico e não-linear. Os restantes casos serão comparados entre si através dos respectivos comportamentos não-lineares.

6.2. MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

Tal como já foi referido, os ensaios de macacos planos são caracterizados pela medição de deslocamentos de pontos de referência tal como exemplificado na Fig.2.9. Esta medição é feita, geralmente, através de sensores de medição estrategicamente posicionados na amostra de parede entre os dois rasgos. Estes instrumentos de medição são conhecidos pelo nome de LVDTs (Linear Variable Differential Transformer), sendo por esta razão que, daqui em diante, serão referidas pelo nome de LVDT.

Durante o presente capítulo serão apresentados resultados relativos ao estado de deformação da parede, tendo como base a medição relativa de deslocamentos entre pontos previamente seleccionados. Nas Fig.6.1 e 6.2 apresentam-se os pontos de medição arbitrados para este trabalho, entre os rasgos do Bloco Central, tendo em conta a condição de simetria da parede.

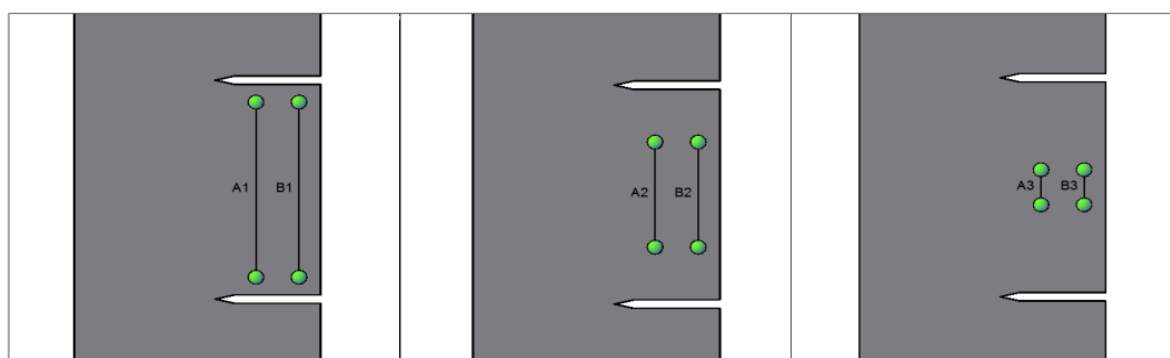


Fig.6.1. – Bases de medição verticais

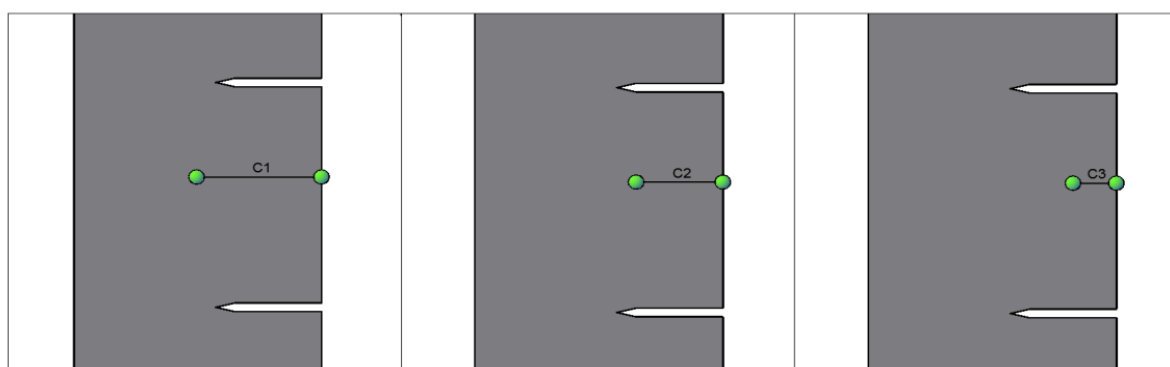


Fig.6.2. – Bases de medição horizontais

Estas bases de medição foram obtidas através da ligação entre pontos do modelo da parede. Pontos estes que foram seleccionados criteriosamente de modo a coincidirem com os nós da malha de elementos finitos da parede.

No Quadro 6.2 apresentam-se os comprimentos das bases de medição escolhidas, bem como os nós de ligação que as caracterizam. As coordenadas dos nós escolhidos encontram-se no anexo A.2 no Quadro A.2.

Quadro 6.2 – Comprimentos dos LVDTs

LVDTs	Pontos	Comprimento (mm)
A1	A1-A6	400,0
A2	A2-A5	240,0
A3	A3-A4	80,0
B1	B1-B6	400,0
B2	B2-B5	240,0
B3	B3-B4	80,0
C1	C1-C4	252,5
C2	C2-C4	175,0
C3	C3-C4	87,5

6.3. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE

6.3.1. DESCRIÇÃO GERAL

Para a análise da parede base, e com vista ao desenvolvimento dos diferentes casos de estudo, torna-se fundamental conhecer os níveis de carga instalados devido às diversas acções aplicadas. Esta primeira abordagem permite não só efectuar uma primeira comparação entre as respostas do modelo às forças introduzidas, mas também revelar a importância da consideração da não-linearidade material na simulação numérica deste tipo de estrutura.

A análise da parede será feita considerando, numa primeira instância, um comportamento linear elástico para a alvenaria e, posteriormente, a lei de comportamento não-linear exposta anteriormente. Os resultados serão interpretados com base no estado de deformação e no estado de tensão da estrutura, analisando-se as tensões gerais segundo o eixo X (SMXX), segundo o eixo Y (SMYY) e segundo o eixo Z (SMZZ).

Os gráficos das envolventes de tensões instaladas serão apresentados com uma escala de valores cuja coloração será distribuída caso a caso, excepto, em análises comparativas, onde a escala será uniformizada para abranger todos os valores registados.

O referencial utilizado é um ponto de vista de coordenadas (7,-5,5), cuja perspectiva se apresenta na Fig.6.3. Pontualmente, serão apresentados outros referenciais para efeitos de visualização de zonas mais pormenorizadas da parede.

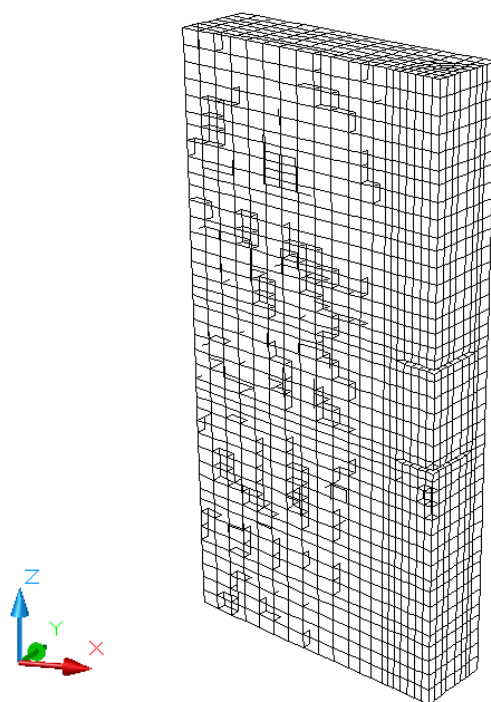


Fig.6.3. – Malha de Elementos Finitos

O caso base da parede é caracterizado pelas seguintes acções, definidas no capítulo anterior:

- Peso Próprio (PP) = 37 KN
- Força no Topo (FT) = 70 KN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 KN

6.3.2. COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos considerando que a alvenaria possui um comportamento linear elástico.

6.3.2.1. Peso Próprio e Força no Topo da Parede (PP+FT)

Na Figura 6.4(a) apresenta-se a deformada da parede (escala de proporção 1:50) face à acção do peso próprio e da força de 70KN no topo da estrutura. São também apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, na Figura 6.4(b), 6.4(c) e 6.4(d), respectivamente.

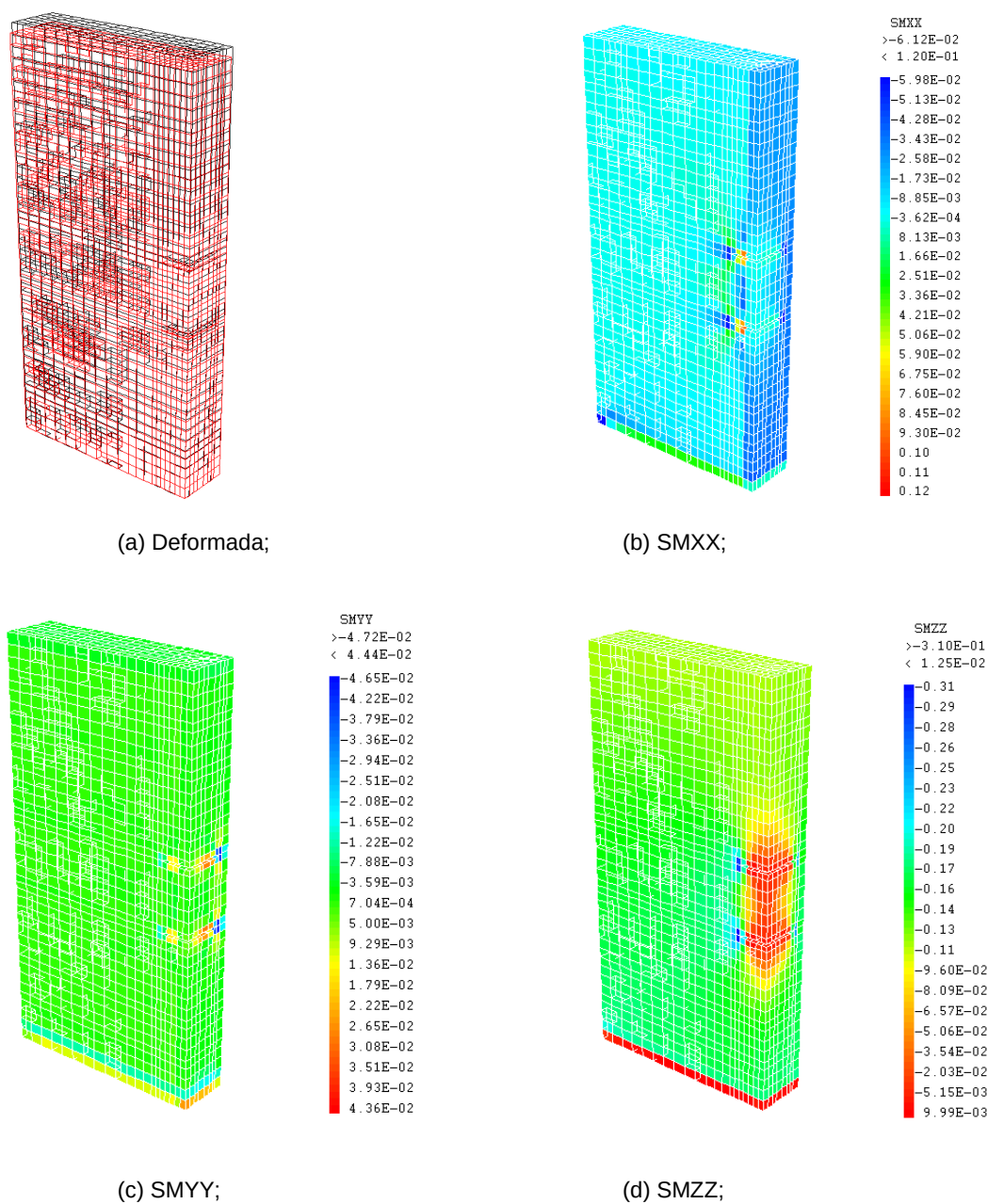


Fig.6.4. – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT

No Quadro 6.3 apresentam-se os deslocamentos lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção conjunta do peso próprio e da força no topo da parede.

Quadro 6.3 – Deslocamentos lineares para a acção PP+FT (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
107	0,04548	0,03661	0,01342	0,01077	0,00756	0,00290	-0,00160	-0,00378	0,00000

Note-se que, nos três mapas de tensões, a fiada horizontal da malha na base, apresenta uma coloração diferente do resto da parede. Na análise do modelo, e para uma visualização mais eficaz das tensões, foi dada uma instrução na rotina que, em vez de registar as tensões encontradas nos nós da malha, atribui a cada um dos elementos o valor médio das tensões que nele se encontram. Relaciona-se assim que esta coloração específica é um resultado directo da condição fronteira imposta à estrutura, no capítulo anterior, pelo que não deverá ser tomada em conta na análise.

Note-se que o LVDT C3 não apresenta qualquer deslocamento. Os LVDTs C1 e C2 apresentam valores negativos de deslocamento pois foi essa a convenção arbitrada, mudando-se assim o sinal dos deslocamentos em compressão para positivo e deslocamentos em tracção para negativo.

Um pormenor da deformada da zona dos rasgos, para este carregamento, pode ser visualizado na Fig.A.2 em anexo.

Também em anexo, na figura A.4, se pode observar o gráfico de relação linear Força/Deslocamento, sob a acção conjunta do peso próprio e da força no topo da parede.

No Quadro 6.4 apresentam-se as extensões lineares, para a acção conjunta do peso próprio e da força no topo da parede.

Quadro 6.4 – Valores das extensões lineares para a acção PP+FT

EXTENSÕES PP+FT				
LVDT	L (mm)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)
A1	400	0,04548	0,114	0,178
A2	240	0,03661	0,153	0,178
A3	80	0,01342	0,168	0,178
B1	400	0,01077	0,027	0,178
B2	240	0,00756	0,031	0,178
B3	80	0,00290	0,036	0,178
LVDT	L (mm)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)
C1	252,5	-0,00160	-0,006	0,178
C2	175	-0,00378	-0,022	0,178

É importante referir que o LVDT C3 não consta no quadro anterior pelo facto de não apresentar variações no campo de deformações ao longo do carregamento.

6.3.2.2. Força nos Rasgos (FM)

Na Figura 6.5(a) apresenta-se a deformada da parede (escala de proporção 1:50) face à acção do peso próprio, da força de 70kN no topo da estrutura e da força de 70kN nos rasgos. São também apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, na Figura 6.5(b), 6.5(c) e 6.5(d), respectivamente.

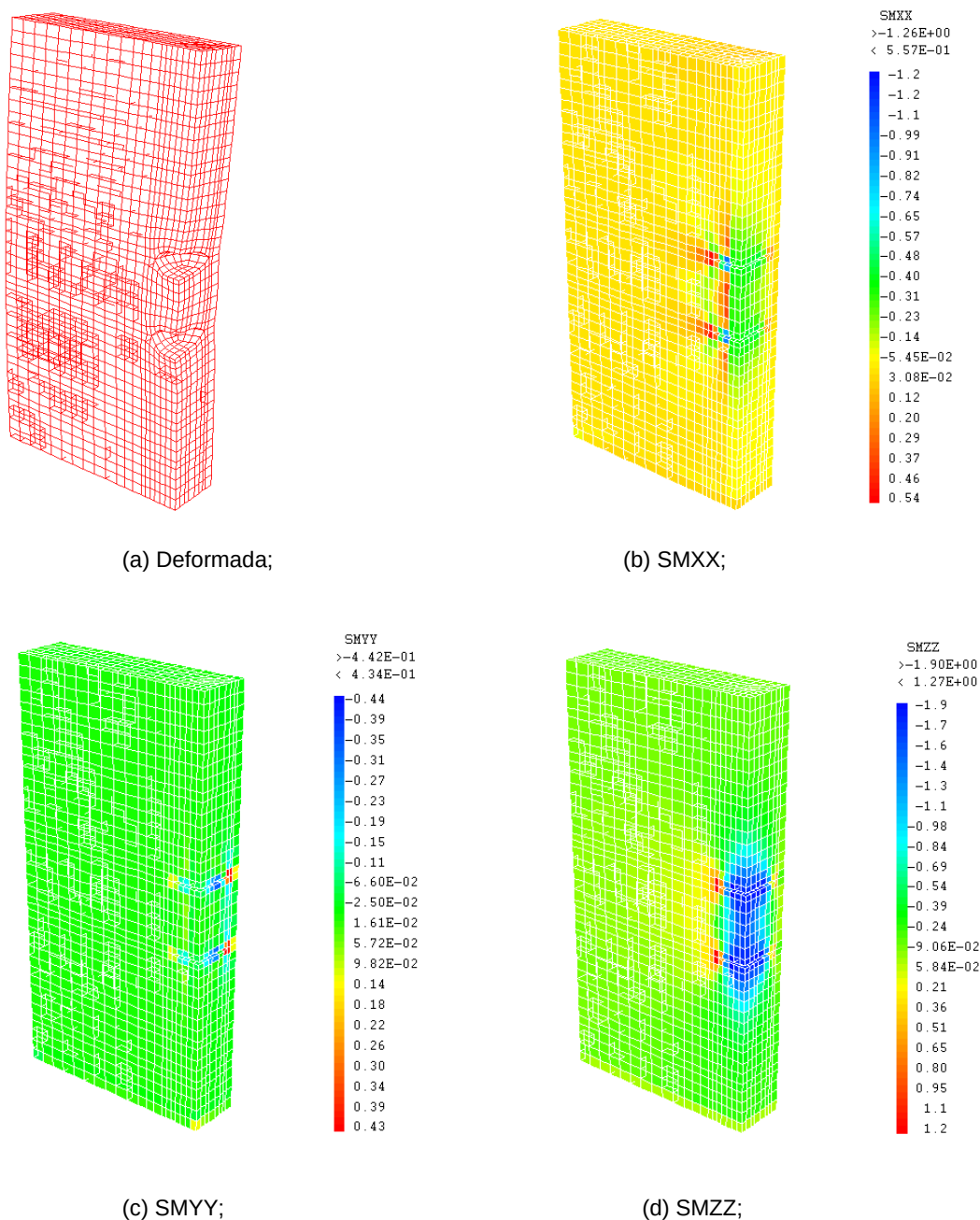


Fig.6.5 – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT+FM

No Quadro 6.5 apresentam-se os deslocamentos lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.5 – Deslocamentos lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
70	1,49628	0,79257	0,25097	1,96532	1,16048	0,38031	-0,13703	-0,11962	0,00000

O pormenor da deformada na zona dos macacos planos, para este carregamento, pode ser observado na Fig.A.3 no anexo deste documento. Também em anexo, na Fig.A.6, se pode observar o gráfico de relação linear Força/Deslocamento, sob a acção conjunta do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

No Quadro 6.6 apresentam-se as extensões lineares, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores encontrados para os coeficientes de Poisson, nesta análise linear, têm um carácter meramente representativo dos resultados obtidos. Estes coeficientes foram calculados através da razão entre a extensão horizontal e a extensão vertical média dos respectivos LVDTs.

Quadro 6.6 – Valores das extensões lineares para a acção FM

EXTENSÕES FM						
LVDT	L (mm)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	
A1	400	1,49628	3,741	1,842	0,492	
A2	240	0,79257	3,302	1,842	0,558	
A3	80	0,25097	3,137	1,842	0,587	
B1	400	1,96532	4,913	1,842	0,375	
B2	240	1,16048	4,835	1,842	0,381	
B3	80	0,38031	4,754	1,842	0,388	
LVDT	L (mm)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	-0,13703	-0,543	1,842	4,327	0,125
C2	175	-0,11962	-0,684	1,842	4,069	0,168

Em seguida, na Fig.6.6, apresenta-se o gráfico de relação linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

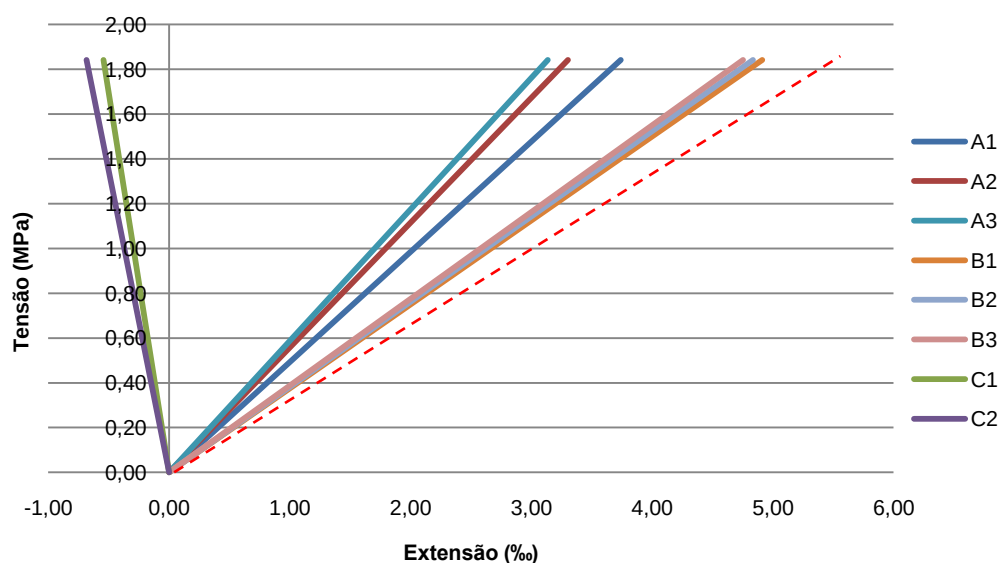


Fig.6.6. – Extensões lineares para a acção FM

Note-se que, os LVDTs de base B apresentam deformações mais elevadas do que os LVDTs de base A, o que faz todo o sentido, visto estarem posicionados mais próximo do eixo de simetria da parede, alinhamento que sofre maiores extensões devido ao efeito dos macacos planos nos rasgos.

A linha vermelha a tracejado na Fig.6.6, representa a curva “real” de comportamento linear elástico correspondente ao ensaio de calibração efectuado.

6.3.3. COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos considerando que a alvenaria possui um comportamento não-linear.

6.3.3.1. Peso Próprio e Força no Topo da Parede (PP+FT)

Na Figura 6.7(a) apresenta-se a deformada da parede (escala de proporção 1:50) face à acção do peso próprio e da força de 70KN no topo da estrutura. São também apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, na Figura 6.7(b), 6.7(c) e 6.7(d), respectivamente.

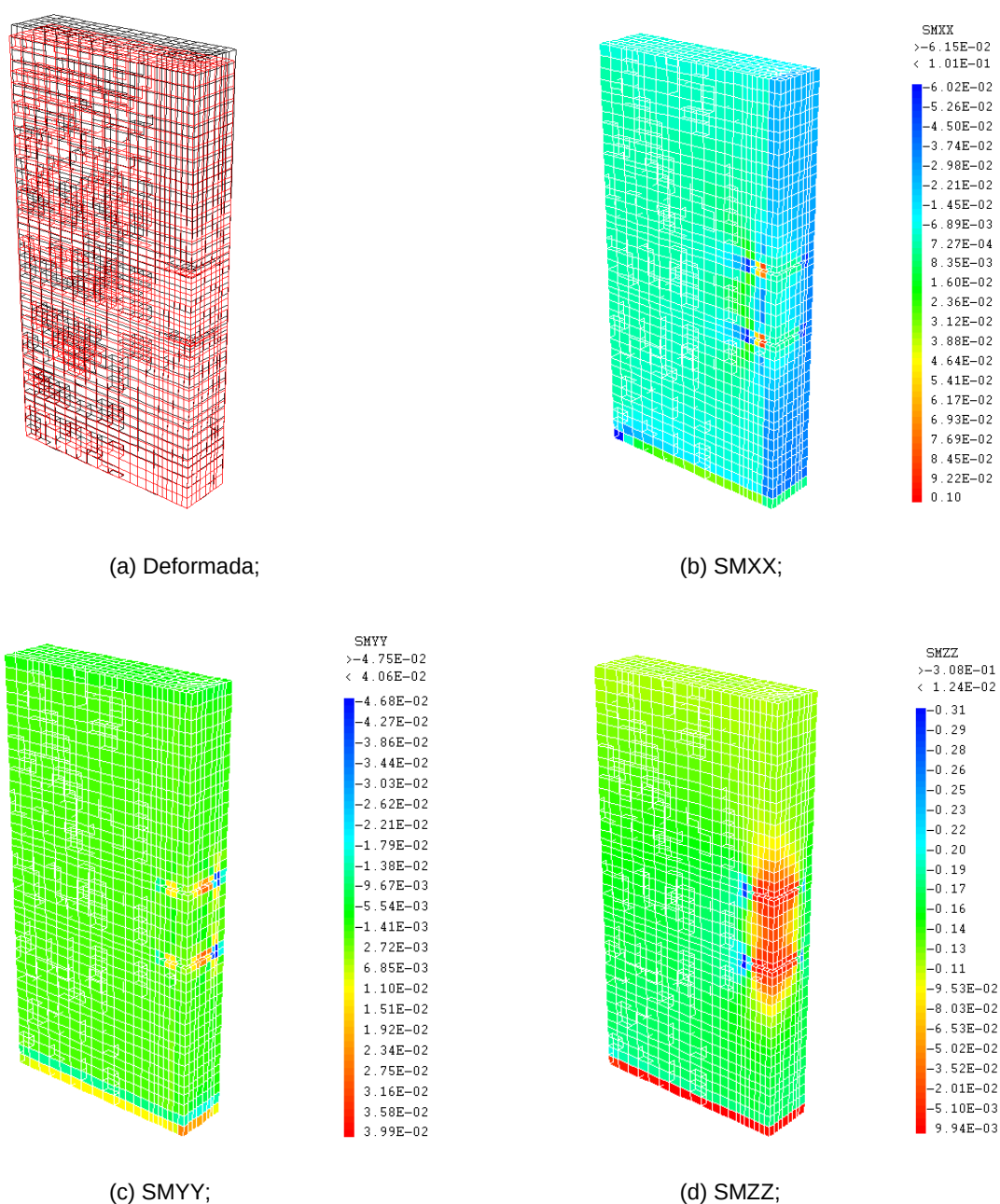


Fig.6.7 – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT

No Quadro 6.7 apresentam-se os deslocamentos medidos nos diferentes LVDTs, para a acção conjunta do peso próprio e da força no topo da parede.

Quadro 6.7 – Deslocamentos não-lineares para a acção PP+FT (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10,7	0,00452	0,00364	0,00133	0,00107	0,00075	0,00029	-0,00016	-0,00039	0,00000
21,4	0,00905	0,00728	0,00267	0,00214	0,00150	0,00058	-0,00032	-0,00079	0,00000
32,1	0,01357	0,01092	0,00400	0,00321	0,00225	0,00086	-0,00048	-0,00118	0,00000
42,8	0,01809	0,01456	0,00534	0,00428	0,00301	0,00115	-0,00064	-0,00158	0,00000
53,5	0,02262	0,01820	0,00667	0,00536	0,00376	0,00144	-0,00080	-0,00197	0,00000
64,2	0,02714	0,02184	0,00801	0,00643	0,00451	0,00173	-0,00096	-0,00237	0,00000
74,9	0,03166	0,02548	0,00934	0,00750	0,00526	0,00202	-0,00112	-0,00276	0,00000
85,6	0,03616	0,02911	0,01067	0,00855	0,00599	0,00230	-0,00129	-0,00315	0,00000
96,3	0,04066	0,03270	0,01198	0,00953	0,00666	0,00255	-0,00149	-0,00353	0,00000
107	0,04520	0,03626	0,01328	0,01034	0,00720	0,00276	-0,00173	-0,00389	0,00000

O Quadro 6.7 apresenta os valores dos deslocamentos obtidos para cada incremento de 10% da força total que se pretendia aplicar na simulação numérica. De resto, este procedimento será adoptado para as restantes análises não-lineares.

Em anexo, na Fig.A.5, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção conjunta do peso próprio e da força no topo da parede.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção conjunta do peso próprio e da força no topo da parede, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.3, A.4 e A.5. Estes valores foram considerados para cada incremento de força, justificados pelo comportamento não-linear da análise. Note-se que, os valores encontrados para os coeficientes de Poisson, sob este tipo de comportamento, variam consoante o incremento de força, tal como o módulo de deformabilidade.

6.3.3.2. Força nos Rasgos (FM)

Na Figura 6.8(a) apresenta-se a deformada da parede (escala de proporção 1:50) face à acção do peso próprio, da força de 70KN no topo da estrutura e da força de 70KN nos rasgos. São também apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, na Figura 6.8(b), 6.8(c) e 6.8(d), respectivamente.

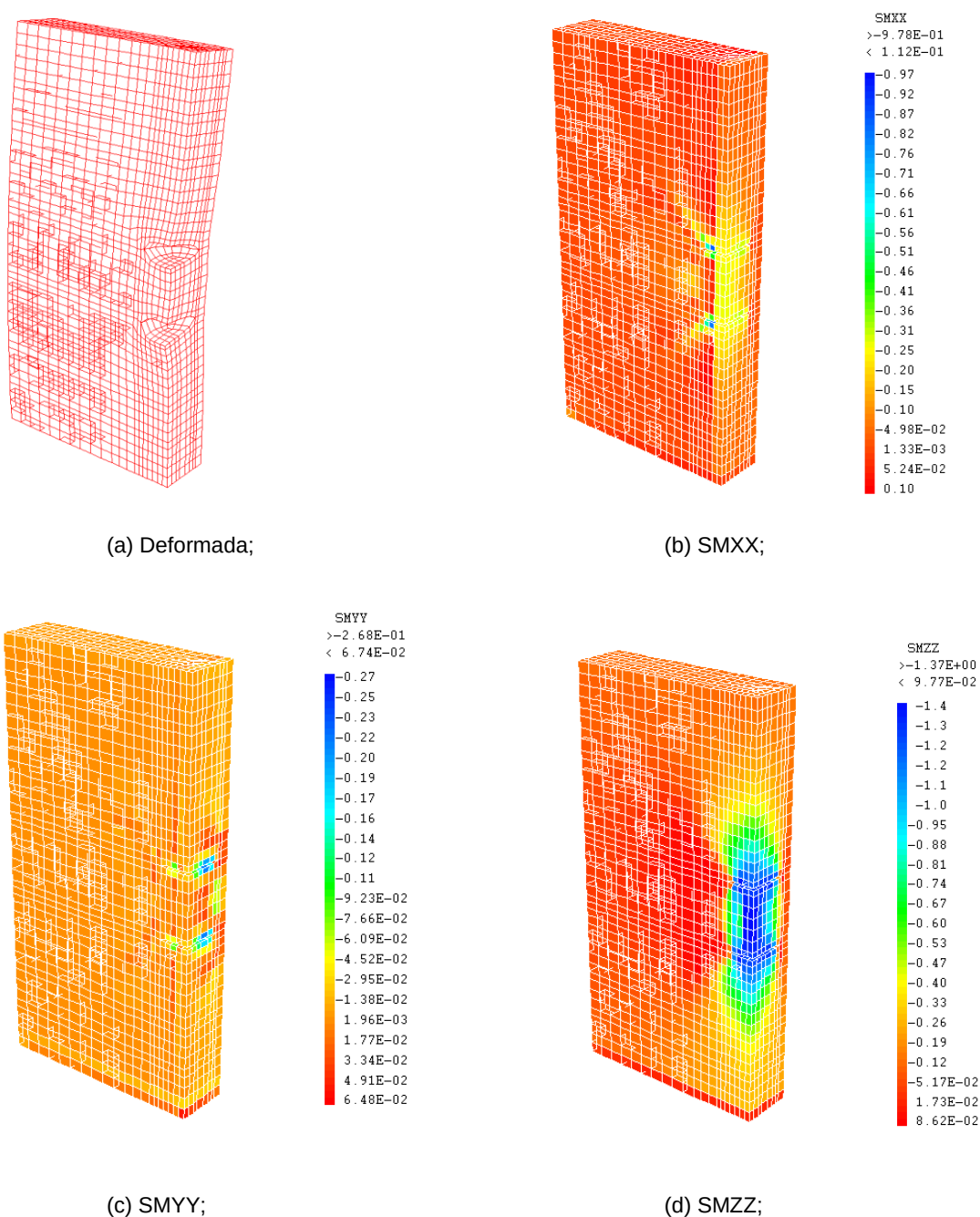


Fig.6.8. – Mapa de Tensões Gerais devido à acção PP+FT+FM

Note-se que, no mapa de tensões SMZZ, da Fig.6.8, a envolvente de tensões se descreve de forma bastante localizada em torno dos rasgos, sem usufruir de toda a sua espessura. A visualização da Fig.6.9 permite perceber que, a fachada posterior da parede, praticamente não é afectada pelas tensões desenvolvidas nos rasgos.

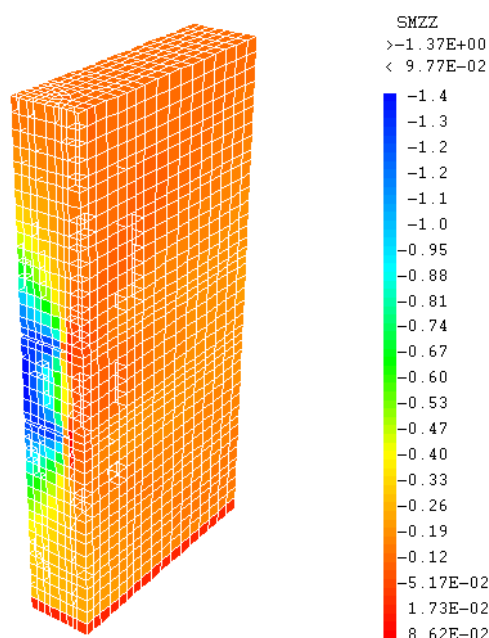


Fig.6.9 – Mapa de Tensões Gerais SMZZ devido à acção PP+FT+FM
(Perspectiva Traseira)

No Quadro 6.8 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.8 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,14967	0,07941	0,02517	0,19692	0,11637	0,03816	-0,01357	-0,00489	0,00000
14	0,30096	0,15950	0,05049	0,39412	0,23290	0,07636	-0,02772	-0,01784	0,00000
21	0,47903	0,25667	0,08083	0,60541	0,35998	0,11851	-0,04710	-0,03404	0,00000
28	0,67519	0,36686	0,11513	0,82747	0,49546	0,16402	-0,07346	-0,05651	0,00000
35	0,90228	0,49799	0,15539	1,07289	0,64934	0,21683	-0,12460	-0,11199	0,00000
42	1,15296	0,64678	0,20261	1,34177	0,82150	0,27673	-0,20461	-0,19974	0,00000
49	1,42185	0,81005	0,25491	1,63089	1,01143	0,35791	-0,30879	-0,31053	0,00000

É importante referir que, a análise não-linear deste modelo não convergiu para cargas superiores a 49KN nos rasgos, pelo que, apenas se apresentam valores até esta força.

Note-se que, mesmo para uma análise não-linear, o LVDT C3 não apresenta quaisquer variações, ao longo do carregamento da estrutura, pelo que a partir deste ponto do trabalho, deixará de ser considerada esta base de medição, visto não ter qualquer efeito ao nível dos resultados. Em anexo, na Fig.A.7, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos. Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.6, A.7 e A.8.

Em seguida, na Fig.6.10, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

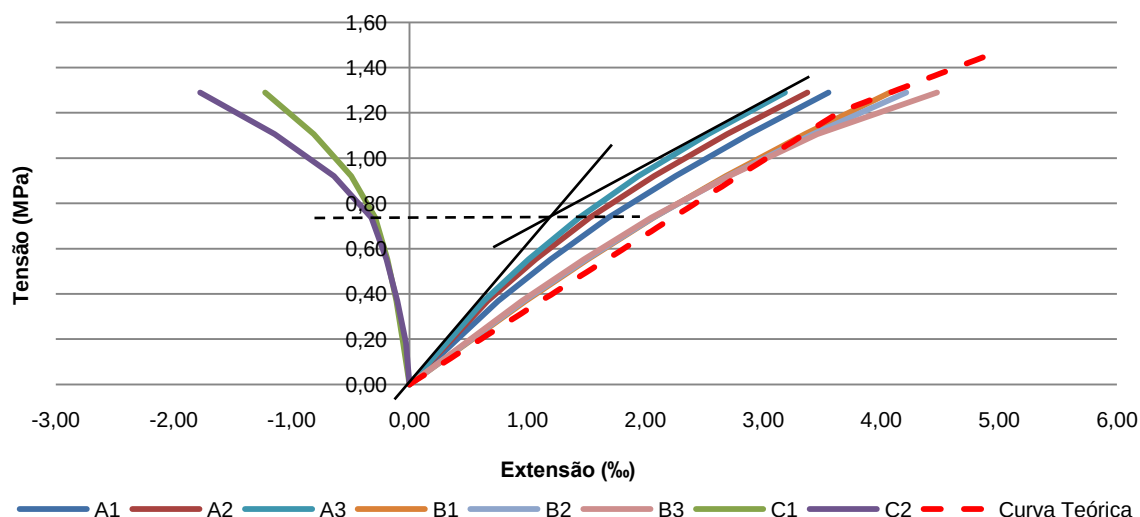


Fig.6.10 – Extensões não-lineares para a acção FM

Note-se que, a linha vermelha a tracejado na Fig.6.10, representa a curva teórica usada para calibração da lei de comportamento não-linear, referida no capítulo anterior. Esta curva prolonga-se pois na sua calibração o valor de compressão máximo imposto foi de 2,5MPa, tensão que não é atingida na simulação numérica pois o material começa a romper muito antes por tracção. De referir ainda que, as curvas de deformação representadas são de carácter monotónico, caracterizadas pela carga por incrementos de força até à ruptura.

O pormenor da deformada na zona dos rasgos, sob comportamento não-linear, não é apresentado pelo facto de ser em tudo semelhante à deformada sob comportamento linear elástico.

Repare-se agora que, quando a tensão atinge sensivelmente os 0,7MPa, as extensões horizontais apresentam uma variação acentuada na inclinação da curva de deformação, fenómeno que também sucede para as extensões verticais, mas de forma menos acentuada. O facto é que, este carregamento corresponde teoricamente, ao momento em que a parede começa a apresentar as primeiras fissuras verticais.

Na Fig.6.11 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para o carregamento FM, onde é possível visualizar o aparecimento do dano de tracção na parede com valor máximo ($d^+ = 1,0$), para o carregamento de 28KN nos rasgos. Representam-se ainda os momentos imediatamente anterior e posterior, onde se percebe que as zonas dos rasgos são as primeiras a apresentarem dano, e por onde se começam a desenvolver os típicos caminhos de ruptura deste tipo de estrutura.

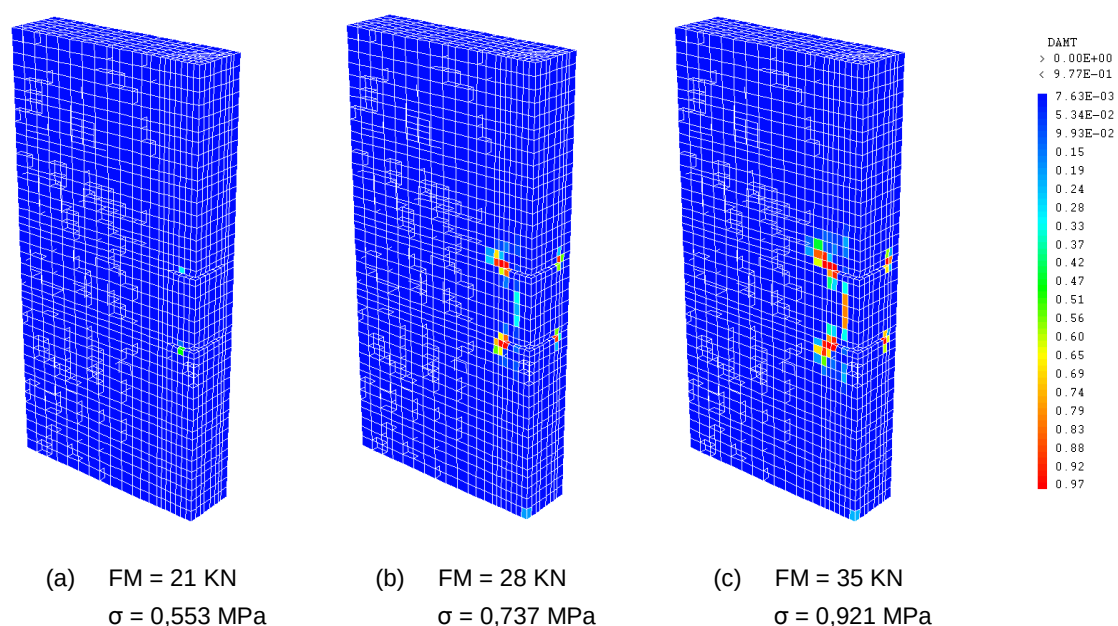


Fig.6.11. – Mapa de Dano de Tracção devido à acção FM

6.3.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento linear elástico e o comportamento não-linear do caso base da Parede, primeiro para a acção do peso próprio e da força no topo da parede e depois para a força nos rasgos.

6.3.4.1. Peso Próprio e Força no Topo da Parede (PP+FT)

No Quadro 6.9 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio e da força no topo da parede.

Quadro 6.9 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT

	Comportamento Linear		Comportamento Não-Linear	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1700	-0,1871	0,1278	-0,1864
SMYY	0,0673	-0,0889	0,0573	-0,0894
SMZZ	0,0242	-0,3661	0,0206	-0,3633

Como se pode verificar no quadro anterior, as tensões gerais apresentam valores muito próximos para ambas as análises. A visualização dos respectivos mapas de tensões (Fig.6.4 e Fig.6.8) permite observar que as tensões máximas de tracção se encontram segundo o eixo XX, na zona dos rasgos. Também as tensões máximas de compressão se encontram na zona dos rasgos, mas segundo o eixo ZZ da análise.

No Quadro 6.10 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio e da força no topo da parede. Note-se que a medida $D_{\text{máx}}$ corresponde ao deslocamento máximo registado nos LVDTs verticais, enquanto $A_{\text{máx}}$ corresponde ao deslocamento máximo sofrido pela altura total da parede no alinhamento dos rasgos.

Quadro 6.10 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT

	Comportamento Linear	Comportamento Não-Linear
$D_{\text{máx}}$ (mm)	0,0455	0,0452
$A_{\text{máx}}$ (mm)	1,3794	1,3721

Observando as figuras que ilustram as várias deformadas obtidas e os respectivos valores máximos, pode concluir-se que as diferenças encontradas entre o comportamento linear elástico e o comportamento não-linear, para o carregamento PP+FT, são mínimas. Considera-se assim a partir deste ponto que, o carregamento do peso próprio e da força no topo da parede é desprezável para a análise do comportamento da parede.

6.3.4.2. Força nos Rasgos (FM)

Esta comparação de resultados será feita para a força de 49KN visto que foi o último incremento para o qual a análise não-linear convergiu.

No Quadro 6.11 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.11 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Comportamento Linear		Comportamento Não-Linear	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,7250	-1,2295	0,1278	-1,2561
SMYY	0,5773	-0,4587	0,0942	-0,4013
SMZZ	1,1301	-1,4488	0,1175	-1,4292

Como se pode verificar no quadro anterior, as tensões de tracção, em análise não-linear, não ultrapassam os 0,13MPa, limite imposto na lei de comportamento, no capítulo anterior.

Os valores de compressão mantêm-se muito próximos em ambas as análises. Na análise linear elástica verifica-se que as tensões máximas de tracção e compressão se encontram segundo o eixo vertical ZZ. Já em comportamento não-linear e para este carregamento, regista-se que as tensões máximas de tracção e compressão se encontram segundo o eixo XX e segundo o eixo ZZ, respectivamente.

Na Fig.6.12 é possível visualizar um corte do mapa de tensões gerais segundo o eixo ZZ, ao nível do rasgo superior.

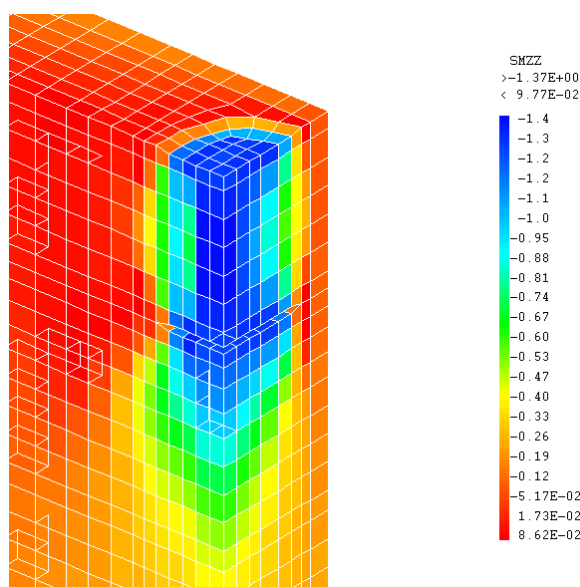


Fig.6.12 – Corte do rasgo superior no mapa de tensões gerais SMZZ, para PP+FT+FM

No Quadro 6.12 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.12 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Comportamento Linear	Comportamento Não-Linear
$D_{\text{máx}}$ (mm)	1,3757	1,6309
$A_{\text{máx}}$ (mm)	0,6822	0,1256

Observando as figuras que ilustram as várias deformadas obtidas e os respectivos valores máximos do quadro anterior, é possível verificar que o deslocamento máximo vertical medido pelos LVDTs regista-se em comportamento não-linear no LVDT B1. No que respeita ao deslocamento máximo da altura total da parede, refere-se que o deslocamento não-linear da parede é mais reduzido. Isto faz sentido na medida em que, após o carregamento PP+FT, a introdução da força FM no rasgo superior provoca uma força ascendente na parte superior da parede, contrariando assim a força imposta no carregamento inicial. Se em comportamento não-linear, o deslocamento registado nos LVDTs verticais, é superior ao deslocamento linear, então o deslocamento final da altura total da parede será mais reduzido.

Nas Fig.6.13, 6.14 e 6.15, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente, para ambos os tipos de análise. Tal como já foi referido, de modo a facilitar a análise comparativa, as escalas dos seguintes gráficos encontram-se uniformizadas.

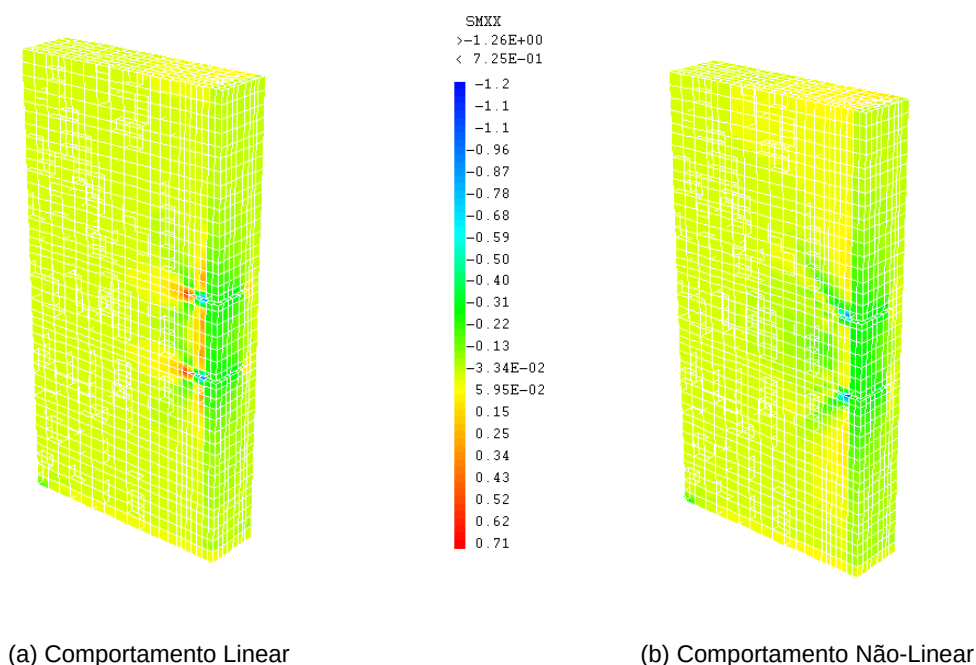


Fig.6.13. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

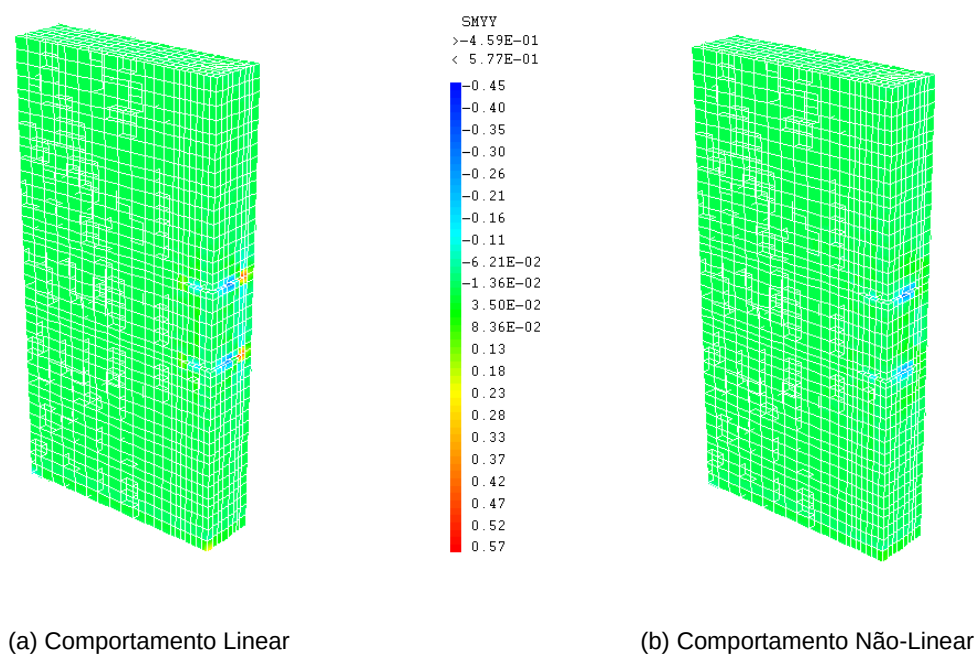


Fig.6.14. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM

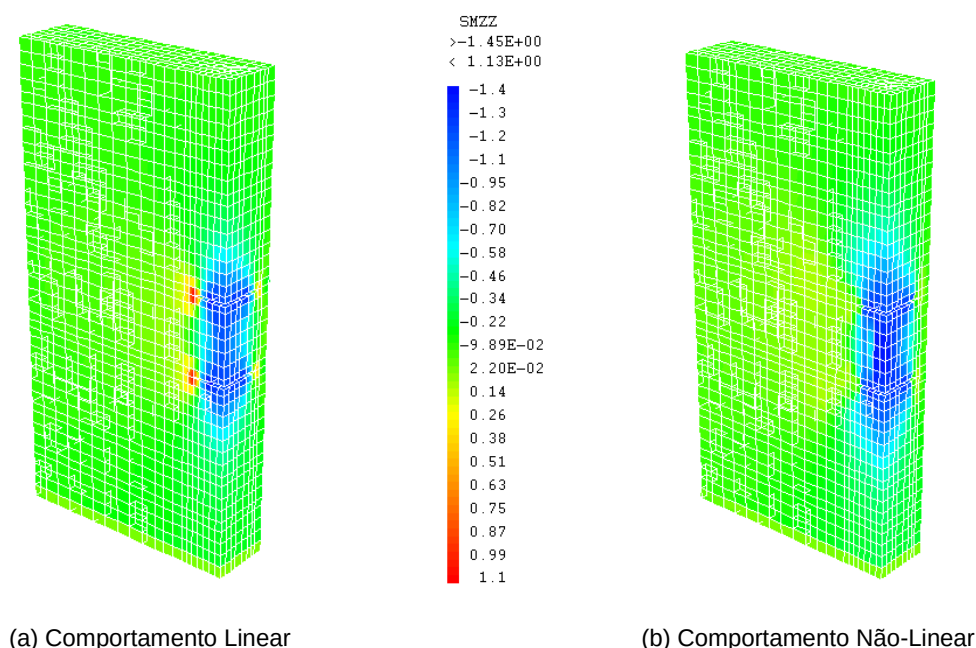


Fig.6.15. – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM

A grande diferença observada nestes mapas de tensões, entre ambos os tipos de comportamento da parede, regista-se pela presença de tensões de tracção mais elevadas sob comportamento linear elástico, resultado directo da imposição de um limite destas tensões na lei de comportamento não-linear.

Os módulos de deformabilidade médios assumidos e determinados para cada LVDT correspondem ao módulo secante no incremento de 30% da força total aplicada nos rasgos. Estes valores foram agrupados pelas bases de medição com o mesmo comprimento, retirando-se assim o valor médio para cada grupo correspondente. De resto, este procedimento será adoptado para as restantes análises.

No Quadro 6.13, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Em parêntesis representa-se a margem de acréscimo entre o valor obtido e o valor de 0,33GPa considerado na análise e que corresponde ao valor “real” numérico da parede. Note-se que, a diferença entre os valores sob comportamento linear elástico e comportamento não-linear, é mínima.

Quadro 6.13 – Valores médios de Deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Linear	Não-Linear
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,434 (+ 31%)	0,432 (+ 31%)
A2+B2	0,469 (+ 42%)	0,467 (+ 42%)
A3+B3	0,487 (+ 48%)	0,485 (+ 47%)

6.4. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE (PLACAS RÍGIDAS)

Para considerar o efeito das chapas de aço utilizadas no ensaio em questão, optou-se por introduzir elementos de maior rigidez a transmitir os esforços para a parede. Elementos estes que actuam como “placas rígidas”, permitindo assim distribuir mais uniformemente a força aplicada nos rasgos.

Usou-se a primeira fiada de elementos da malha, acima e abaixo dos rasgos, para definir cada “placa”, tal como demonstrado na Fig.6.16.

É importante referir que estas placas rígidas foram consideradas na simulação numérica com as mesmas características mecânicas que a restante malha, excepto o módulo de deformabilidade que se optou por arbitrar $E = 200\text{GPa}$, à imagem do aço. O material destas placas rígidas foi assumido como sendo linear elástico e homogéneo.

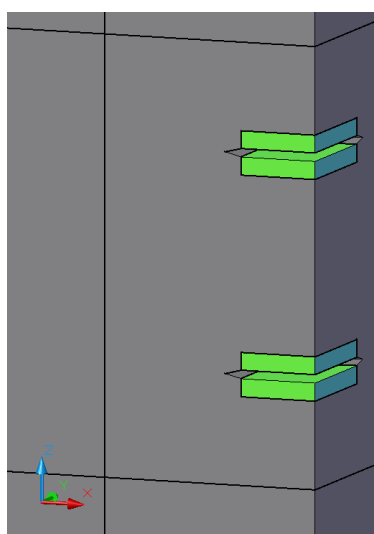


Fig.6.16 – Placas Rígidas na zona dos rasgos

O caso das placas rígidas é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 37 kN
- Força no Topo (FT) = 70 kN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 kN

6.4.1. COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos considerando que a alvenaria possui um comportamento linear elástico, para a acção conjunta do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos (PP+FT+FM).

Na Figura 6.17(a) apresenta-se a deformada da parede (escala de proporção 1:50) face à acção do peso próprio, da força de 70kN no topo da estrutura e da força de 70kN nos rasgos. São também apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, na Figura 6.17(b), 6.17(c) e 6.17(d), respectivamente.

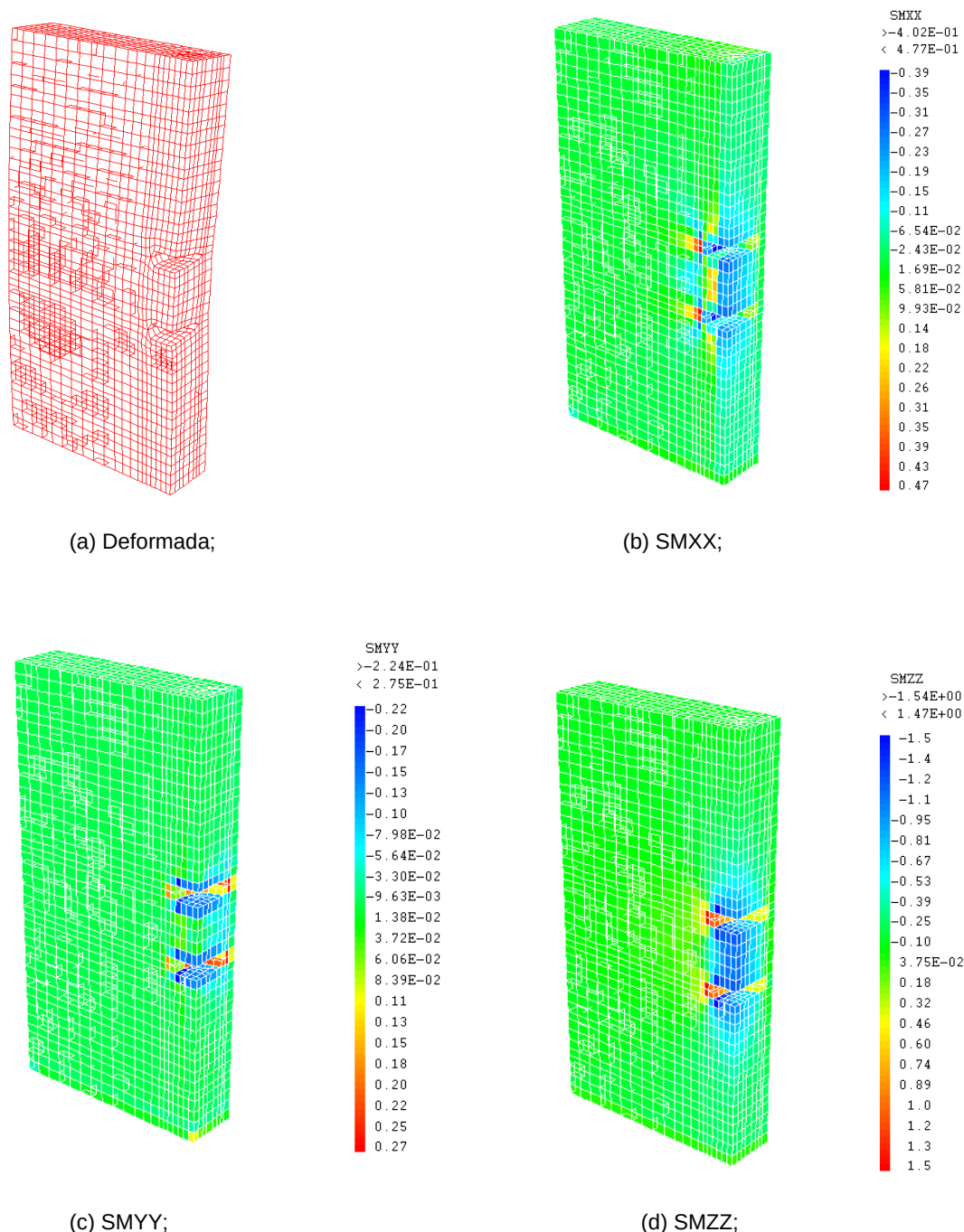


Fig.6.17. – Mapa de Tensões Gerais para a acção PP+FT+FM

O pormenor da deformada na zona dos macacos planos pode ser observado na Fig.A.8 no anexo deste documento. Também em anexo, na Fig.A.9, se pode observar o gráfico de relação linear Força/Deslocamento, para a força nos rasgos.

No Quadro 6.14 apresentam-se os deslocamentos lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.14 – Deslocamentos lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
70	1,30379	0,70718	0,20849	1,31791	0,75323	0,25141	-0,13300	-0,09907

No Quadro 6.15 apresentam-se as extensões lineares, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.15 – Extensões lineares para a acção FM

LVDT	L (mm)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	
A1	400	1,30379	3,259	1,842	0,565	
A2	240	0,70718	2,947	1,842	0,625	
A3	80	0,20849	2,606	1,842	0,707	
B1	400	1,31791	3,295	1,842	0,559	
B2	240	0,75323	3,138	1,842	0,587	
B3	80	0,25141	3,143	1,842	0,586	
LVDT	L (mm)	d (mm)	ε_h (‰)	σ (MPa)	$\varepsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	-0,13300	-0,527	1,842	3,277	-0,161
C2	175	-0,09907	-0,566	1,842	3,043	-0,186

Em seguida, na Fig.6.18, apresenta-se o gráfico de relação linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

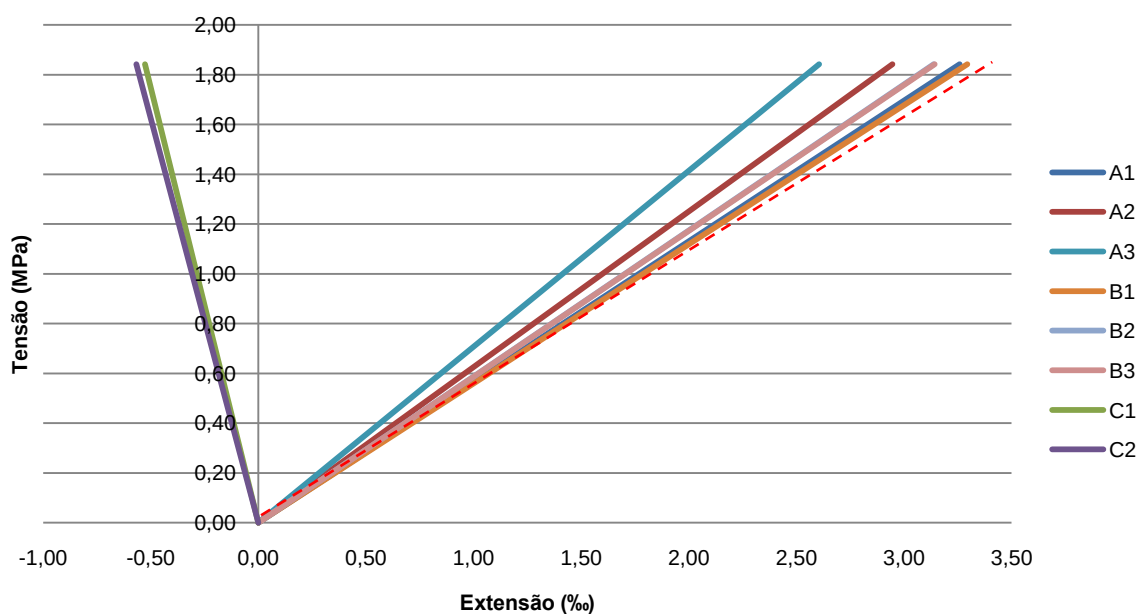


Fig.6.18. – Extensões lineares para a acção FM

6.4.2. COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos considerando que a alvenaria possui um comportamento não-linear, para a acção conjunta do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos (PP+FT+FM).

Na Figura 6.19(a) apresenta-se a deformada da parede (escala de proporção 1:50) face à acção do peso próprio, da força de 70KN no topo da estrutura e da força de 70KN nos rasgos. São também apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, na Figura 6.19(b), 6.19(c) e 6.19(d), respectivamente.

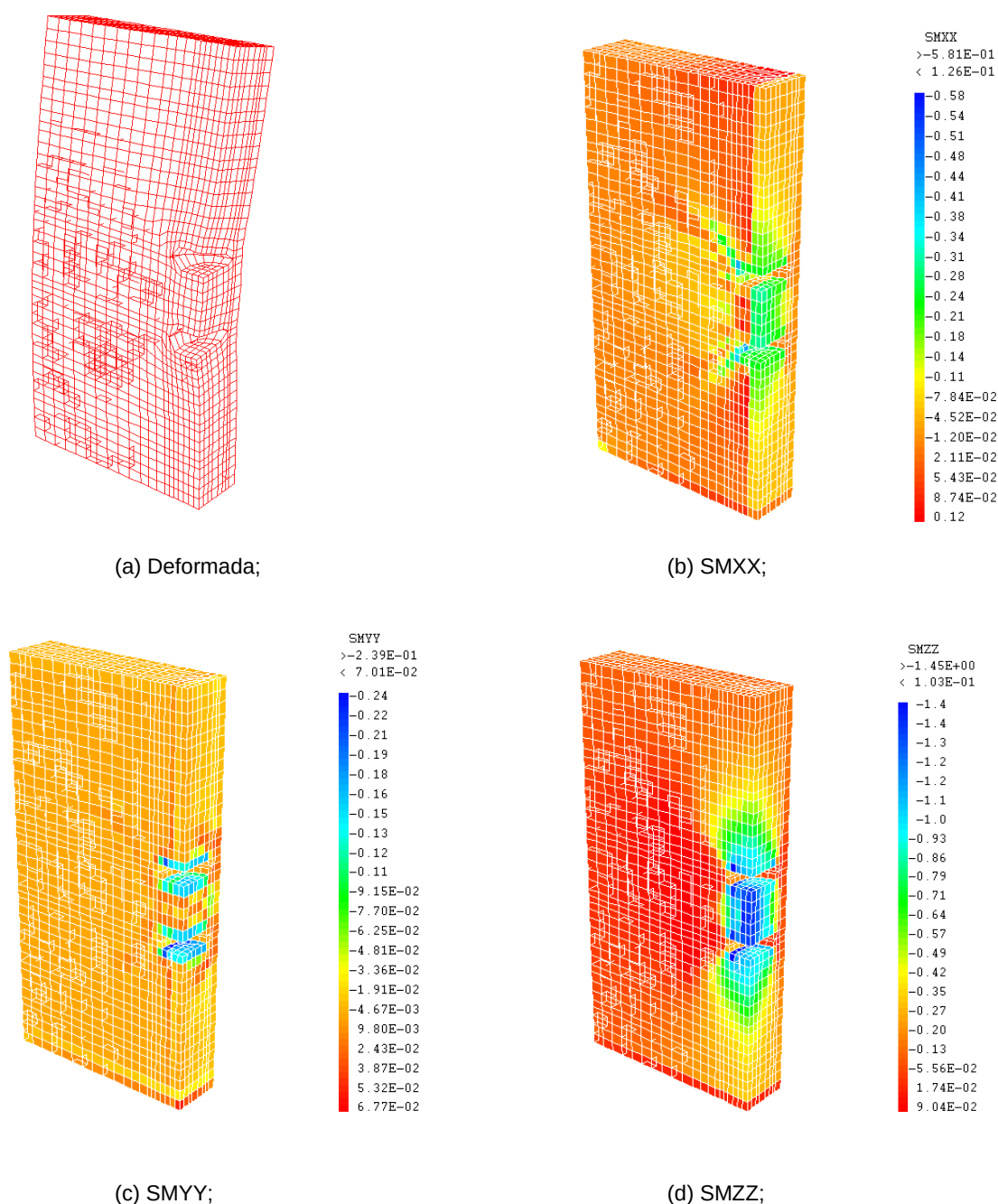


Fig.6.19 – Mapa de Tensões Gerais devido à acção PP+FT+FM

O pormenor da deformada na zona dos rasgos, sob comportamento não-linear, não é apresentado pelo facto de ser em tudo semelhante à deformada sob comportamento linear elástico.

É importante referir que, a análise não-linear deste modelo não convergiu para cargas superiores a 56KN nos rasgos, pelo que, apenas se apresentam valores até esta força.

No Quadro 6.16 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.16 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (kN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,13853	0,07501	0,02216	0,13976	0,07980	0,02662	-0,01310	-0,00502
14	0,28059	0,15227	0,04481	0,28301	0,16169	0,05395	-0,02859	-0,01692
21	0,45981	0,25299	0,07522	0,46293	0,26619	0,08909	-0,05175	-0,03423
28	0,65836	0,37123	0,11251	0,66196	0,38516	0,12964	-0,08134	-0,05678
35	0,87083	0,50486	0,15697	0,87482	0,51476	0,17431	-0,12392	-0,09592
42	1,09304	0,65016	0,20675	1,09746	0,65186	0,22191	-0,18073	-0,15109
49	1,32713	0,80629	0,25996	1,33195	0,79687	0,27251	-0,25326	-0,22306
56	1,58773	0,97691	0,31627	1,59272	0,96120	0,34342	-0,34655	-0,31835

Em anexo, na Fig.A.10, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.9, A.10 e A.11.

Em seguida, na Fig.6.20, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos. Repare-se que, com a introdução das placas rígidas, as extensões não-lineares sofreram uma distribuição muito mais uniforme, apresentando curvas muito próximas.

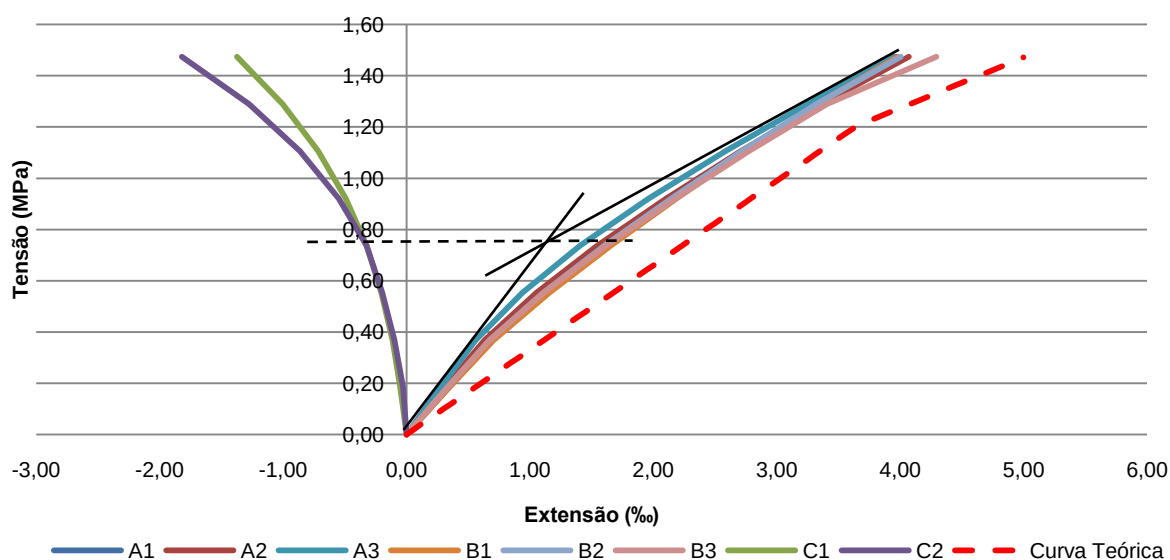


Fig.6.20 – Extensões não-lineares para a acção FM

6.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

6.4.3.1. Comparação Linear / Não-Linear

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento linear elástico e o comportamento não-linear do caso das placas rígidas, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos (PP+FT+FM).

Esta comparação de resultados será feita para a força de 56KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise não-linear convergiu.

No Quadro 6.17 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.17 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Comportamento Linear		Comportamento Não-Linear	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,7347	-0,8636	0,1294	-0,8433
SMYY	0,3893	-0,3189	0,1105	-0,3540
SMZZ	1,5715	-1,5108	0,1237	-1,6788

No que respeita às tensões obtidas, em ambos os tipos de comportamento da parede, verificam-se as mesmas observações registadas para o caso base da parede.

No Quadro 6.18 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.18 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Comportamento Linear	Comportamento Não-Linear
$D_{\text{máx}}$ (mm)	1,0543	1,5927
$A_{\text{máx}}$ (mm)	0,7082	0,2549

Também no que respeita aos deslocamentos máximos obtidos, em ambos os tipos de comportamento da parede, se verificam as mesmas observações registadas para o caso base da parede.

Nas Fig.6.21, 6.22 e 6.23, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente, para ambos os tipos de análise.

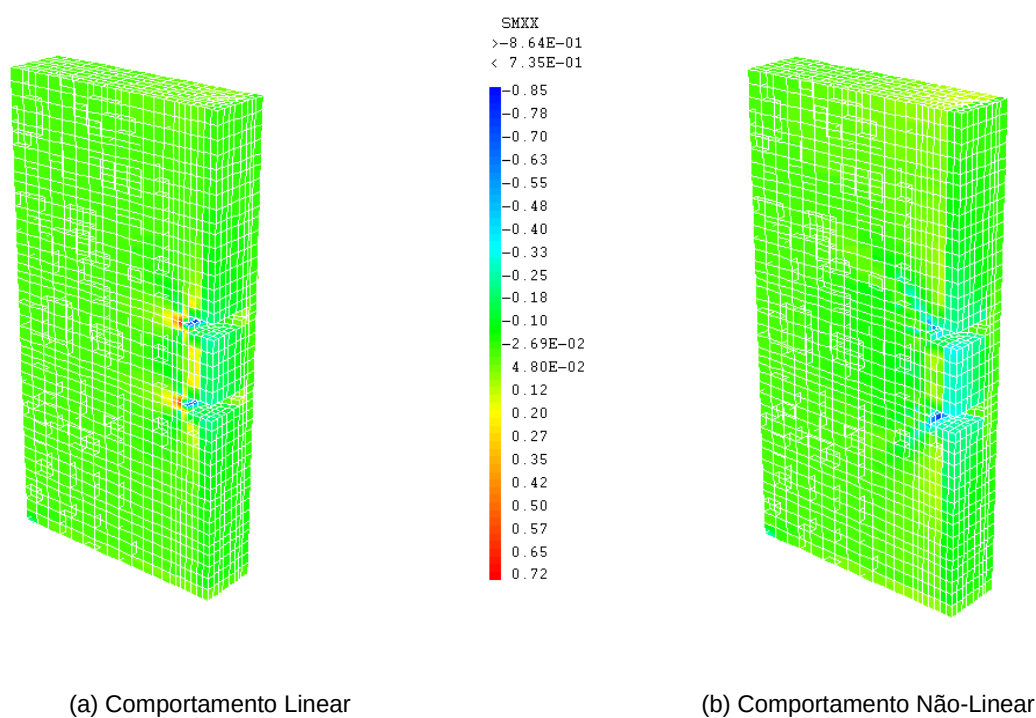


Fig.6.21. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à ação PP+FT+FM

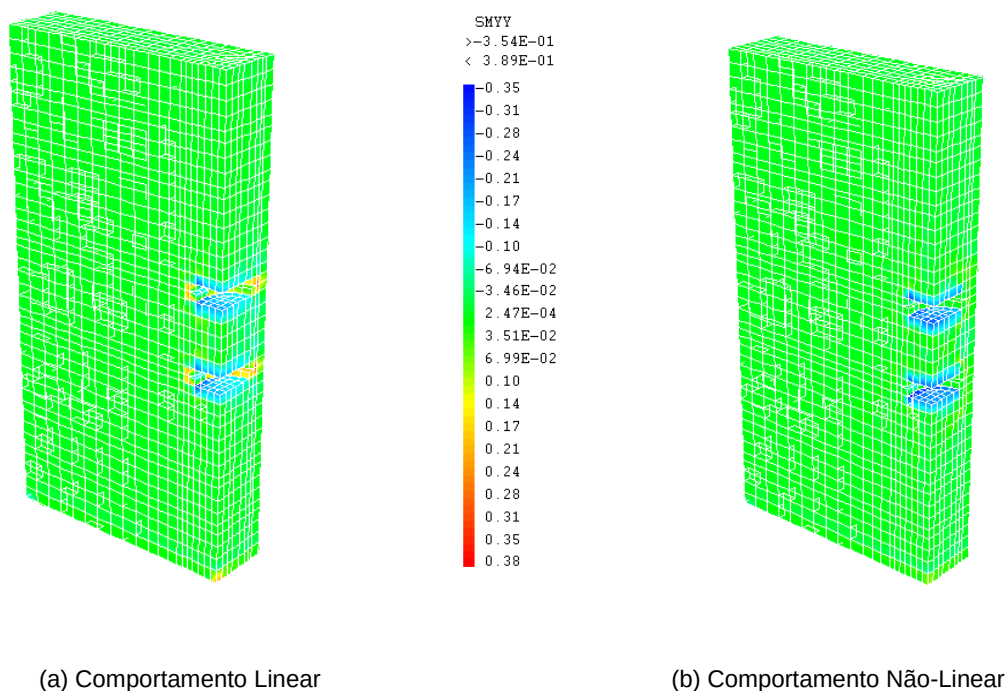
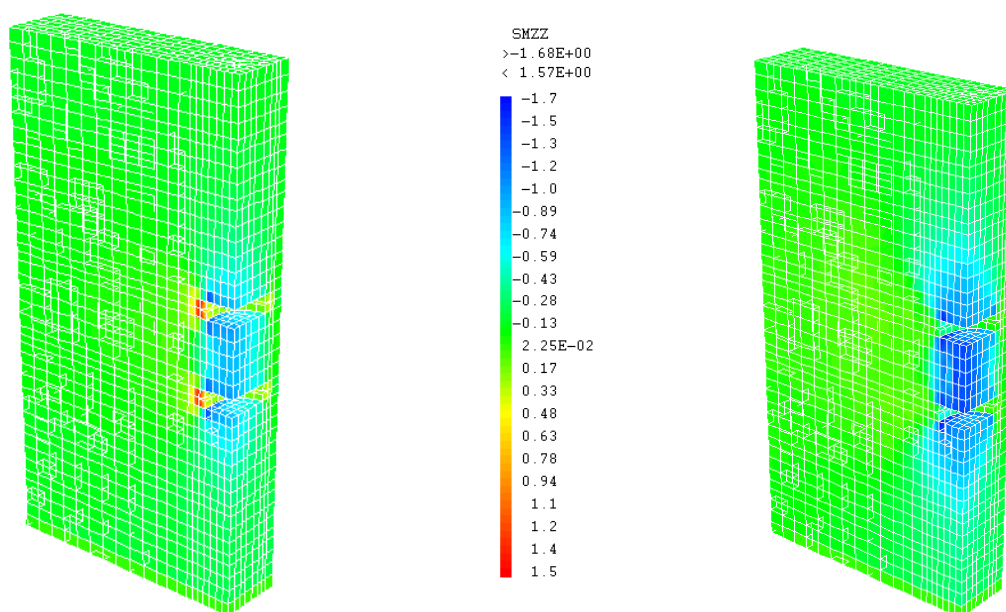


Fig.6.22. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à ação PP+FT+FM



(a) Comportamento Linear

(b) Comportamento Não-Linear

Fig.6.23 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM

Mais uma vez, se verifica que, a grande diferença observada nestes mapas de tensões, entre ambos os tipos de comportamento da parede, regista-se pela presença de tensões de tracção mais elevadas sob comportamento linear elástico.

No Quadro 6.19, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados sob comportamento linear são superiores aos valores encontrados para o comportamento não-linear.

Quadro 6.19 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Linear	Não-Linear
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,562 (+ 70%)	0,479 (+ 45%)
A2+B2	0,606 (+ 84%)	0,511 (+ 55%)
A3+B3	0,646 (+ 96%)	0,542 (+ 64%)

6.4.3.2. Comparação Não-Linear (Caso Base) / Não-Linear (Caso das Placas Rígidas)

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do caso base da parede e o comportamento não-linear do caso das placas rígidas.

Esta comparação de resultados será feita para a força de 49KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise não-linear do caso base convergiu.

No Quadro 6.20 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.20 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso Base		Caso das Placas Rígidas	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1278	-1,2561	0,1286	-0,7707
SMYY	0,0942	-0,4013	0,1045	-0,3111
SMZZ	0,1175	-1,4292	0,1243	-1,5102

No que respeita à análise das tensões, refere-se que as diferenças nas tensões de tracção, para ambos os casos, são mínimas. As tensões de compressão também são muito semelhantes, realçando apenas uma ligeira diferença entre os valores segundo o eixo XX. Relaciona-se esta diferença de valores com o facto de se ter efectuado a análise com o auxílio das placas rígidas, que permitiram que a distribuição dos esforços segundo este eixo, se desse mais uniformemente, equilibrando melhor as tensões envolvidas.

No Quadro 6.21 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.21 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso Base	Caso das Placas Rígidas
D _{máx} (mm)	1,6309	1,3320
A _{máx} (mm)	0,1256	0,1667

Nas Fig.6.24, 6.25 e 6.26, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente, para ambos os tipos de análise.

Na Fig.6.27 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas. Não se mostram os mapas de danos compressão, uma vez que as cargas envolvidas não são suficientemente altas para causar qualquer dano em compressão.

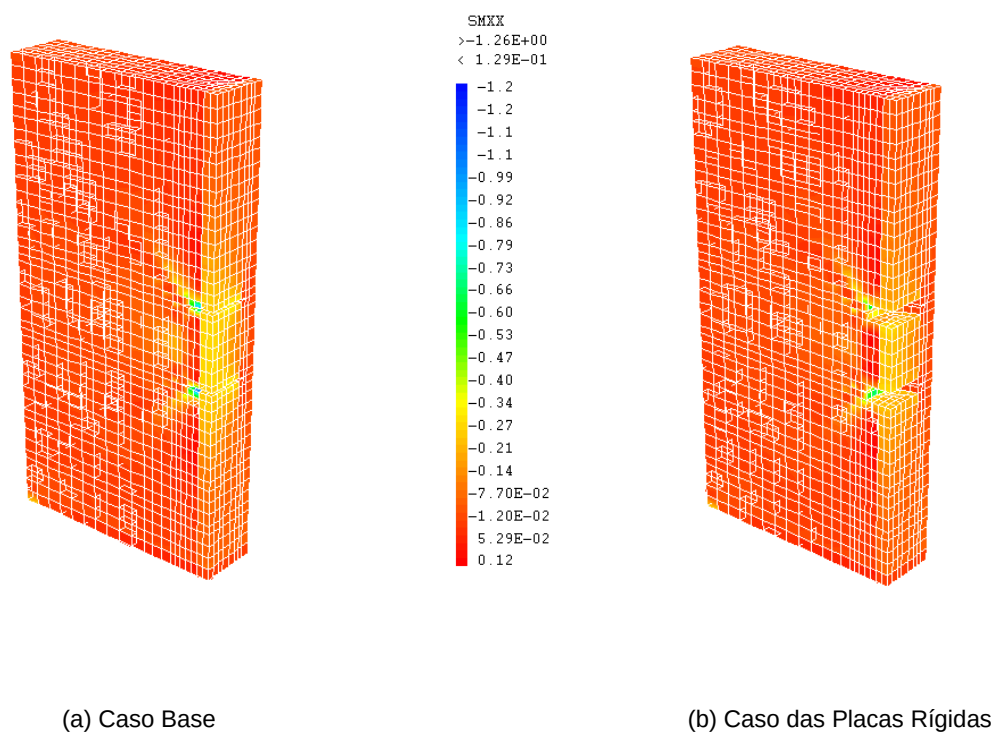


Fig.6.24. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

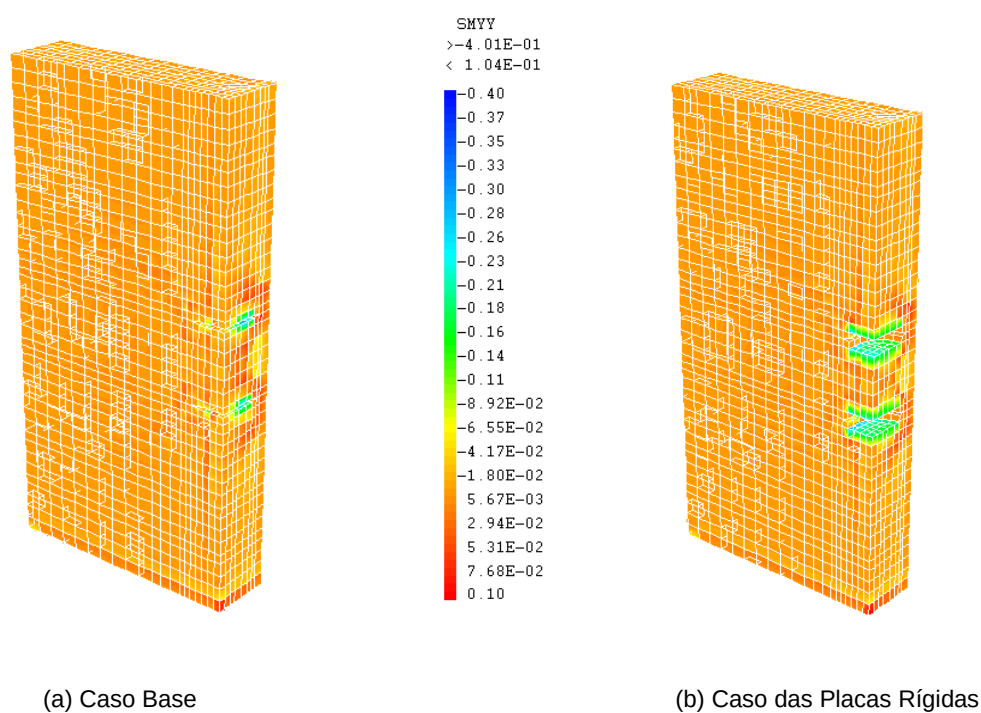


Fig.6.25. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM

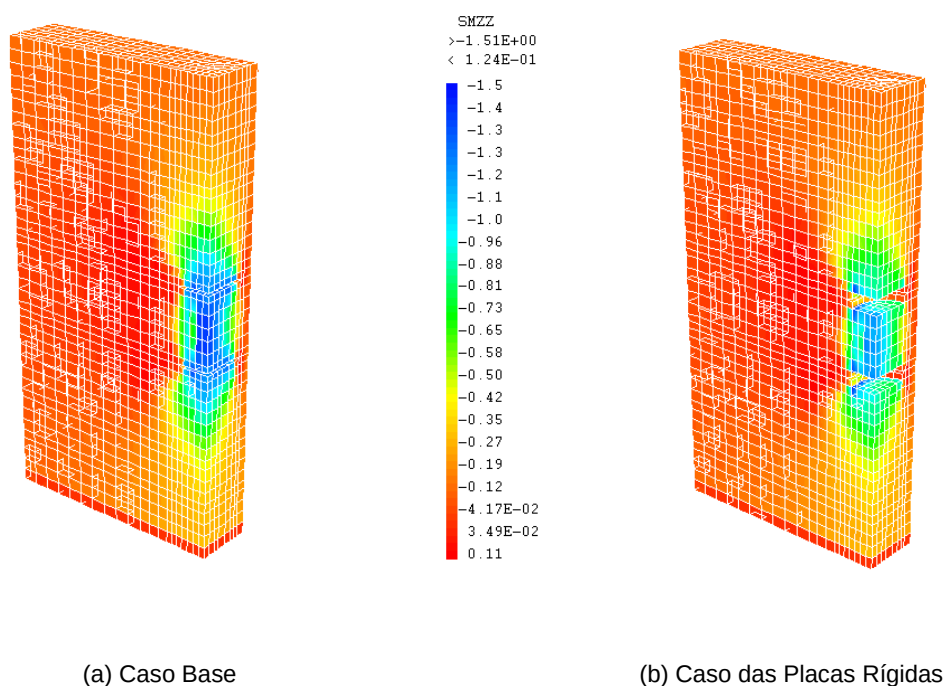


Fig.6.26. – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM

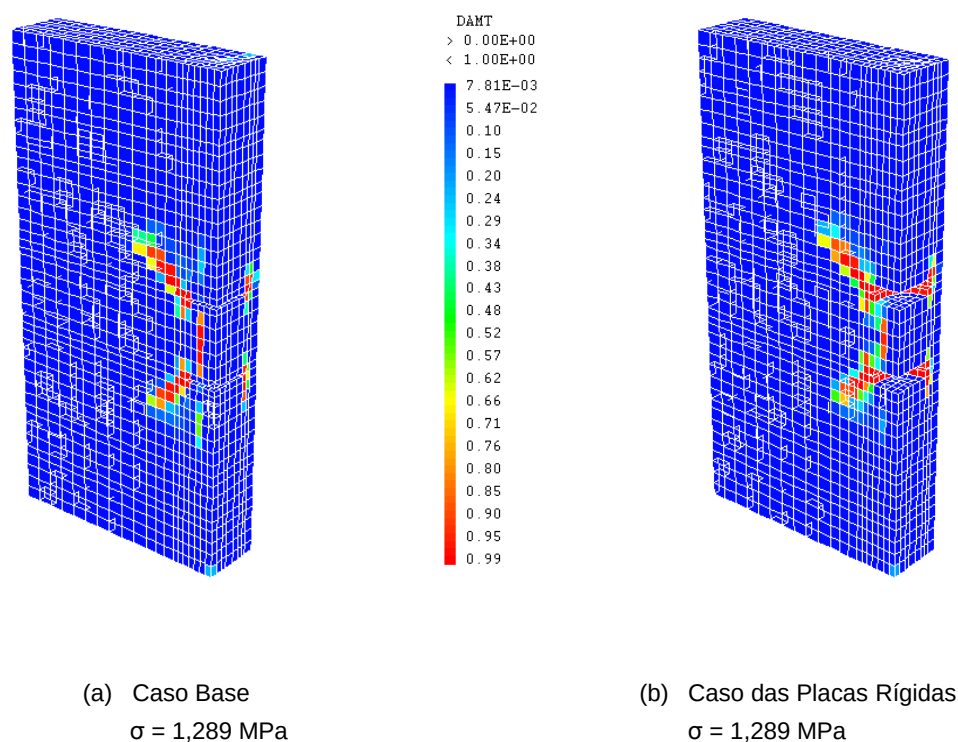


Fig.6.27. – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM

Como se pode verificar nas figuras anteriores, o caso das placas rígidas não apresenta a parcela de malha referente à zona das placas, facto que já poderia ter sido referido, mas que só agora, na comparação com o caso base, se torna evidente.

É importante referir que, o dano de tracção máximo, verificado em ambos os casos é 1,0, como se pode ver pela Fig.6.27. Este valor será atingido em todas as análises efectuadas, pelo que não será novamente mencionado. Verificou-se ainda que a fachada posterior da parede não apresentou qualquer dano de tracção.

No Quadro 6.22, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados no Caso Base são inferiores aos valores encontrados para o Caso das Placas Rígidas.

Quadro 6.22 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso Base	Caso das Placas Rígidas
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,432 (+ 31%)	0,479 (+ 45%)
A2+B2	0,467 (+ 42%)	0,511 (+ 55%)
A3+B3	0,485 (+ 47%)	0,542 (+ 64%)

Na Fig.6.28, é possível observar um corte do mapa de tensões gerais segundo o eixo vertical ZZ (a) e um mapa do Dano em tracção (b), para a força de 56KN ($\sigma=1,474$ MPa) nos rasgos.

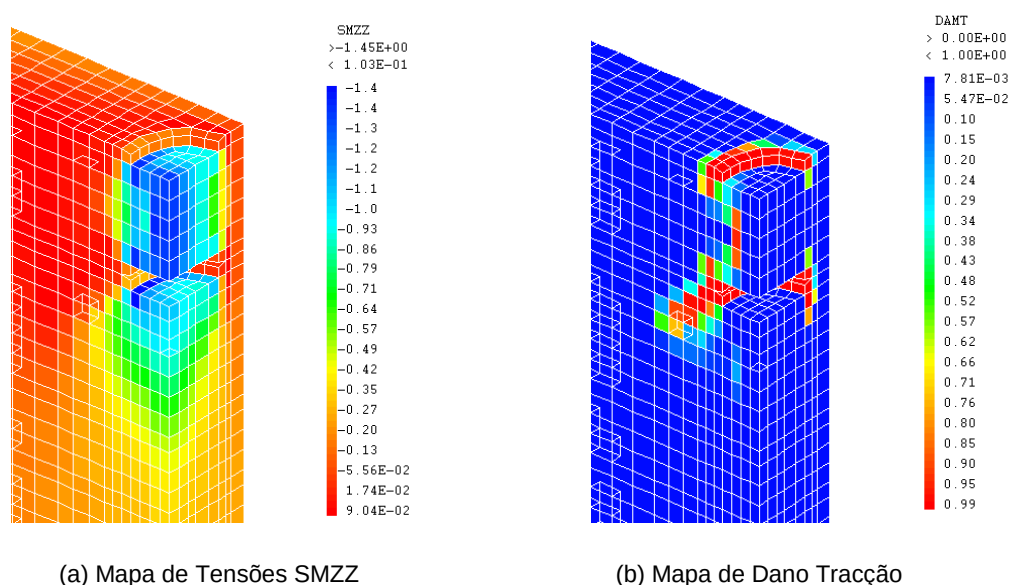


Fig.6.28. – Cortes do Caso das Placas Rígidas com FM=56KN

6.5. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE (FT = 140KN)

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do caso base da parede e o comportamento não-linear do mesmo caso base, mas com uma força de 140KN no topo da parede.

O Caso FT=140KN é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 37 KN
- Força no Topo (FT) = 140 KN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 KN

Esta comparação de resultados será feita para a força de 49KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise não-linear do caso base convergiu.

No Quadro 6.23 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.23 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,14947	0,08075	0,02567	0,20137	0,11921	0,03911	-0,01249	0,00000
14	0,29960	0,16082	0,05103	0,39928	0,23636	0,07755	-0,02553	-0,01246
21	0,45231	0,24140	0,07643	0,59700	0,35324	0,11588	-0,03982	-0,02554
28	0,62843	0,33583	0,10559	0,80740	0,47961	0,15777	-0,05855	-0,04176
35	0,82821	0,44718	0,13930	1,03294	0,61776	0,20433	-0,08751	-0,07033
42	1,06305	0,58301	0,18035	1,28821	0,77958	0,26032	-0,14860	-0,14005
49	1,31970	0,73609	0,22914	1,56597	0,95880	0,32295	-0,23734	-0,23809
56	1,64871	0,91874	0,28628	1,94869	1,19666	0,40401	-0,35061	-0,35828
63	2,01696	1,12193	0,35170	2,36510	1,45902	0,49367	-0,47860	-0,49175

Em anexo, na Fig.A.11, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.12, A.13 e A.14.

Em seguida, na Fig.6.29, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

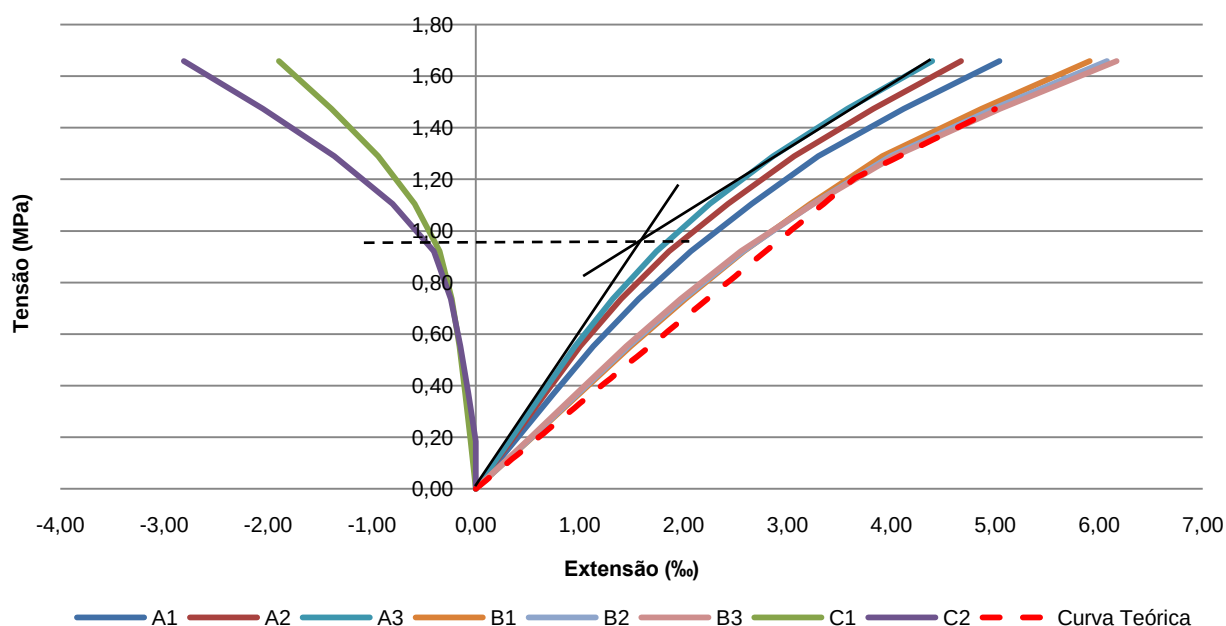


Fig.6.29 – Extensões não-lineares para a acção FM

No Quadro 6.24 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.24 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso Base		Caso FT=140KN	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1278	-1,2561	0,1250	-1,1436
SMYY	0,0942	-0,4013	0,1065	-0,3852
SMZZ	0,1175	-1,4292	0,1252	-1,4250

No que respeita à análise de tensões, entre o Caso Base e o Caso FT=140KN, refere-se que não se registaram diferenças significativas, como é demonstrado no quadro anterior.

No Quadro 6.25 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.25 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso Base	Caso FT=140KN
D _{máx} (mm)	1,6309	1,5660
A _{máx} (mm)	0,1256	1,5452

Nas Fig.6.30, 6.31 e 6.32, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente. Na Fig.6.33 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas.

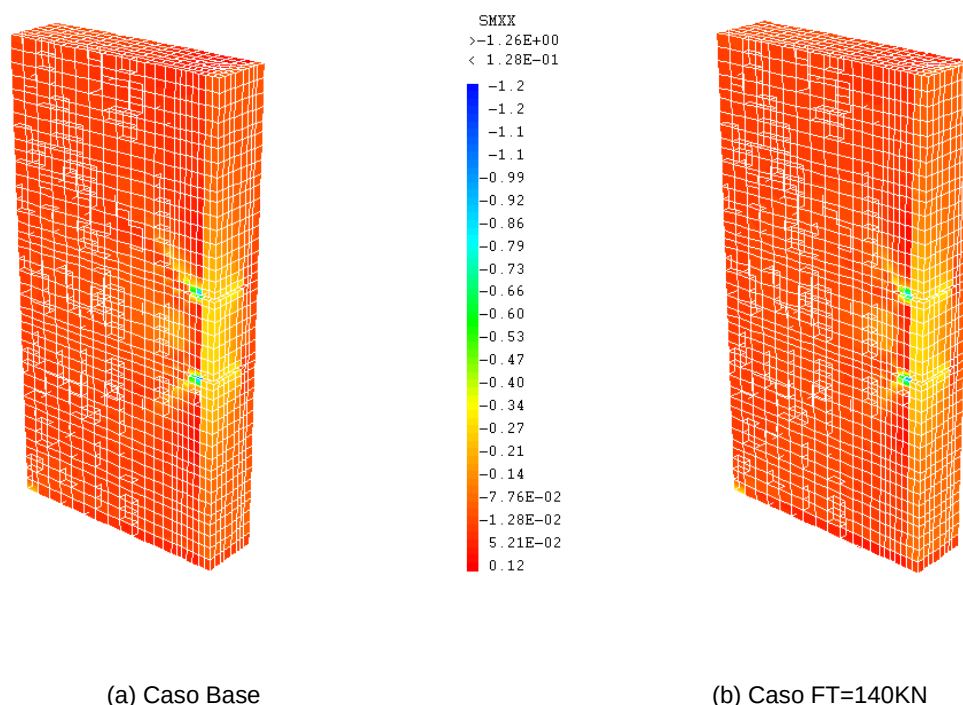


Fig.6.30. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

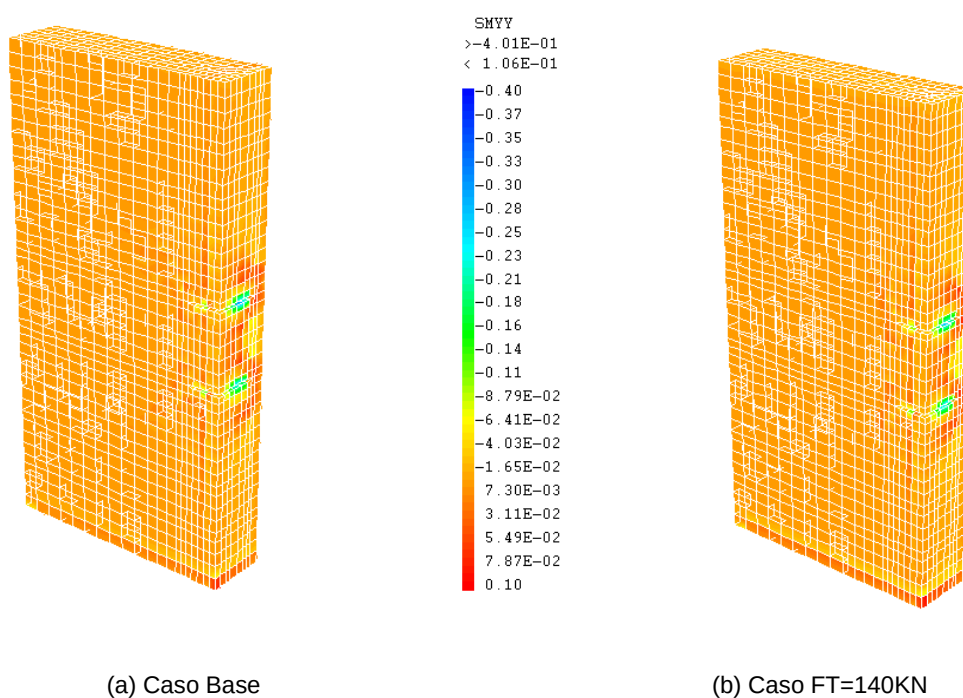
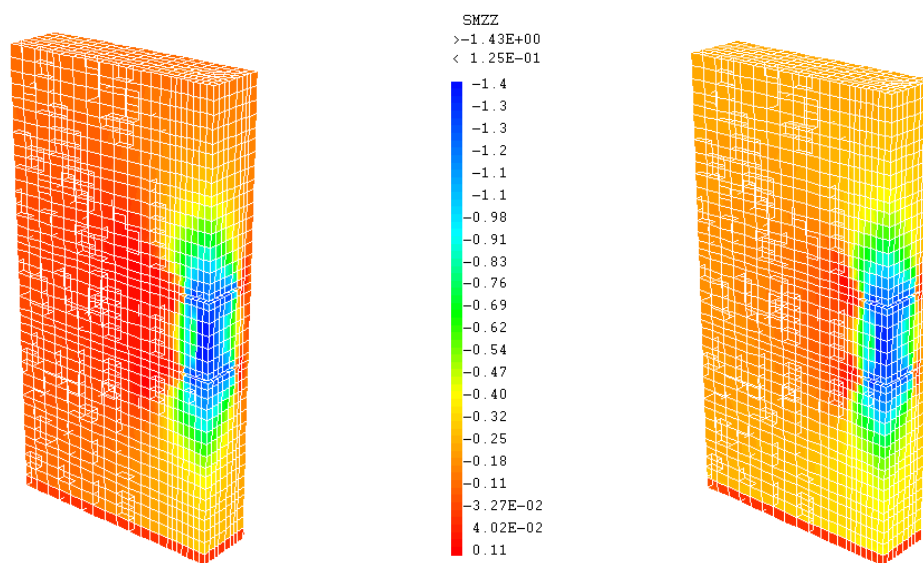


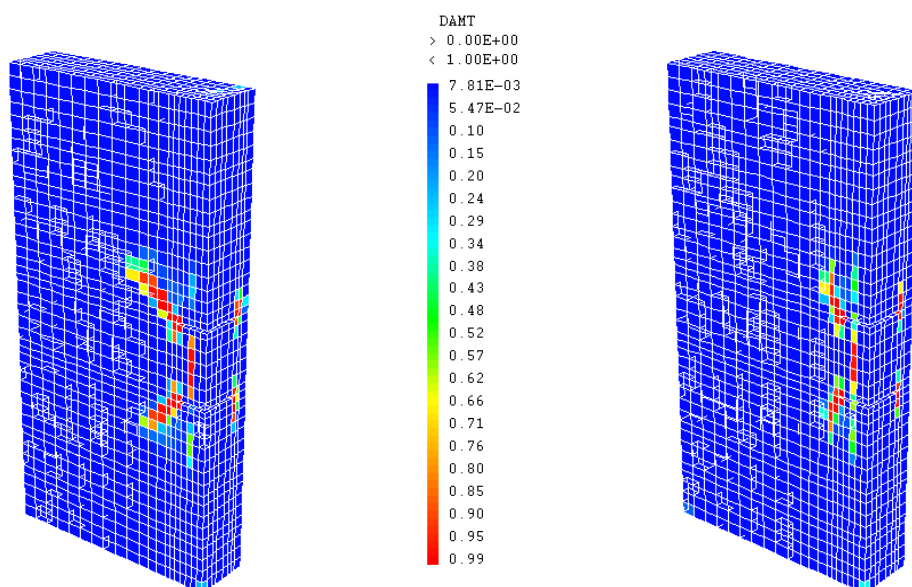
Fig.6.31. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso Base

(b) Caso FT=140KN

Fig.6.32. – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso Base

$\sigma = 1,289 \text{ MPa}$

(b) Caso FT=140KN

$\sigma = 1,289 \text{ MPa}$

Fig.6.33. – Mapa de Dano de Tração devido à acção PP+FT+FM

No Quadro 6.26, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados para ambos os casos, não apresentam diferenças significativas.

Quadro 6.26 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso Base	Caso FT=140KN
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,432 (+ 31%)	0,429 (+ 30%)
A2+B2	0,467 (+ 42%)	0,462 (+ 40%)
A3+B3	0,485 (+ 47%)	0,480 (+ 45%)

Relativamente aos resultados observados no Quadro 6.25, salienta-se que, a grande diferença entre ambos os casos, encontra-se no deslocamento máximo da altura total da parede, sendo muito superior no Caso FT=140KN. Isto explica-se através da carga imposta no topo da parede, que é também superior à do Caso Base.

Outro factor a ter em conta, é o facto do Caso Base apresentar um maior contraste de tensões de tracção ao longo da parede, segundo o eixo ZZ. Esta diferença também se explica pelo facto da força no topo da parede do Caso FT=140KN ser o dobro da força aplicada no Caso Base, permitindo uma distribuição de esforços mais equilibrada.

Note-se que à semelhança do caso das placas rígidas, os mapas de dano em tracção, apresentam a vermelho mais carregado os elementos com dano máximo ($d^+ = 1,0$), que formam um padrão de ruptura, típico da deformação nas paredes de alvenaria de pedra, para este tipo de ensaios. Verifica-se ainda que, estes caminhos de ruptura apresentam uma inclinação de 45° relativamente ao eixo horizontal do Caso Base, enquanto os caminhos de ruptura do Caso FT=140KN apresentam uma inclinação mais acentuada, devido ao incremento de força no topo da parede. Também é possível constatar que, no Caso Base, estes caminhos de ruptura, apresentam-se mais desenvolvidos, razão pela qual não convergiu para valores mais elevados da força nos rasgos, como no caso FT=140KN.

6.6. ANÁLISE DO CASO 2

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do Caso FT=140N e o comportamento não-linear do Caso 2 da parede.

O Caso 2 é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 153 KN
- Força no Topo (FT) = 140 KN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 KN

Esta comparação de resultados será feita para a força de 63KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual ambas as análises não-lineares convergiram.

No Quadro 6.27 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.27 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,15100	0,08179	0,02603	0,20179	0,11961	0,03928	-0,01314	0,00188
14	0,30249	0,16280	0,05175	0,40034	0,23725	0,07791	-0,02680	-0,01084
21	0,45640	0,24438	0,07754	0,59882	0,35471	0,11646	-0,04156	-0,02412
28	0,63316	0,33942	0,10698	0,80968	0,48145	0,15849	-0,06065	-0,04044
35	0,83262	0,45051	0,14072	1,03497	0,61940	0,20497	-0,08933	-0,06823
42	1,06627	0,58561	0,18143	1,28925	0,78044	0,26065	-0,14916	-0,13660
49	1,32139	0,73732	0,22956	1,56552	0,95852	0,32284	-0,23550	-0,23219
56	1,64990	0,91903	0,28613	1,94821	1,19641	0,40384	-0,34925	-0,35311
63	2,02742	1,12823	0,35359	2,37349	1,46538	0,49593	-0,48670	-0,49604

Em anexo, na Fig.A.12, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.15, A.16 e A.17.

Em seguida, na Fig.6.34, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

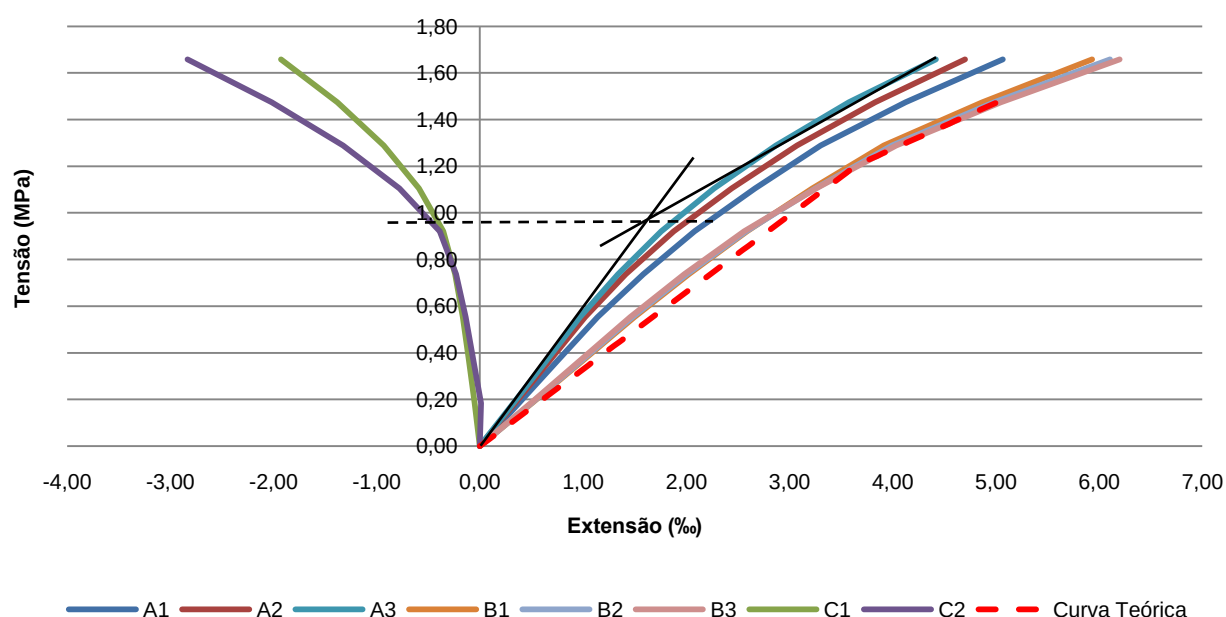


Fig.6.34 – Extensões não-lineares para a acção FM

No Quadro 6.28 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.28 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN		Caso 2	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1276	-1,4117	0,1285	-1,4087
SMYY	0,1229	-0,4797	0,1217	-0,4820
SMZZ	0,1169	-1,8261	0,1143	-1,8305

No que respeita à análise de tensões, entre o Caso FT=140KN e o Caso 2, refere-se que não se registaram diferenças significativas, como é demonstrado no quadro anterior.

No Quadro 6.29 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.29 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN	Caso 2
D _{máx} (mm)	2,3651	2,3735
A _{máx} (mm)	1,0110	1,2722

Nas Fig.6.35, 6.36 e 6.37, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente. Na Fig.6.38 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas.

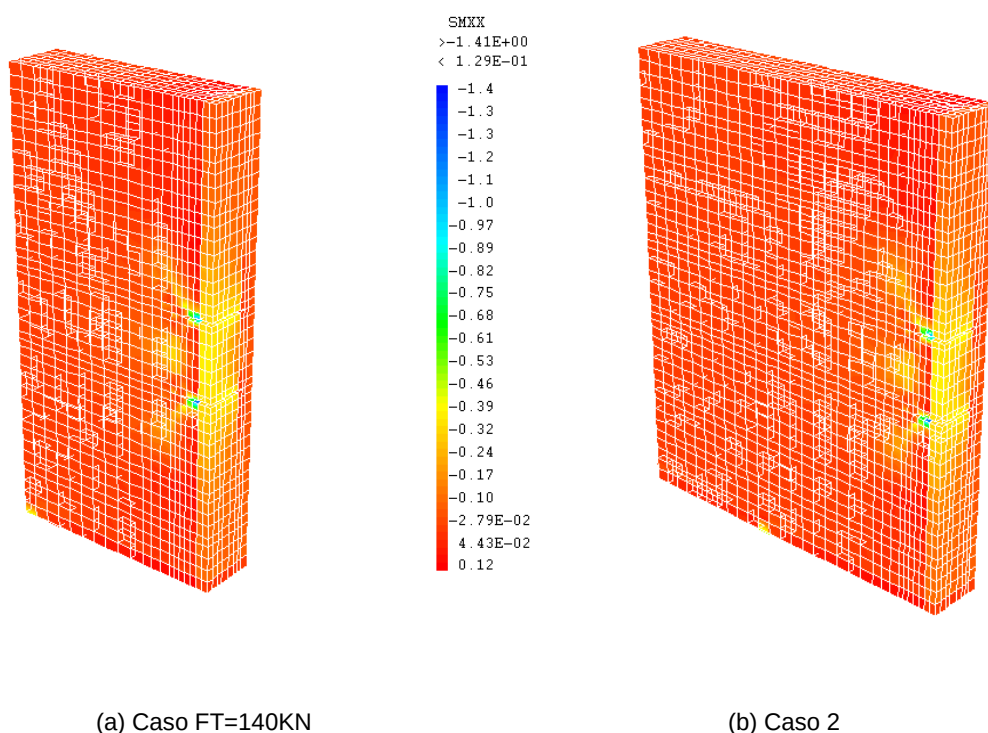


Fig.6.35. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

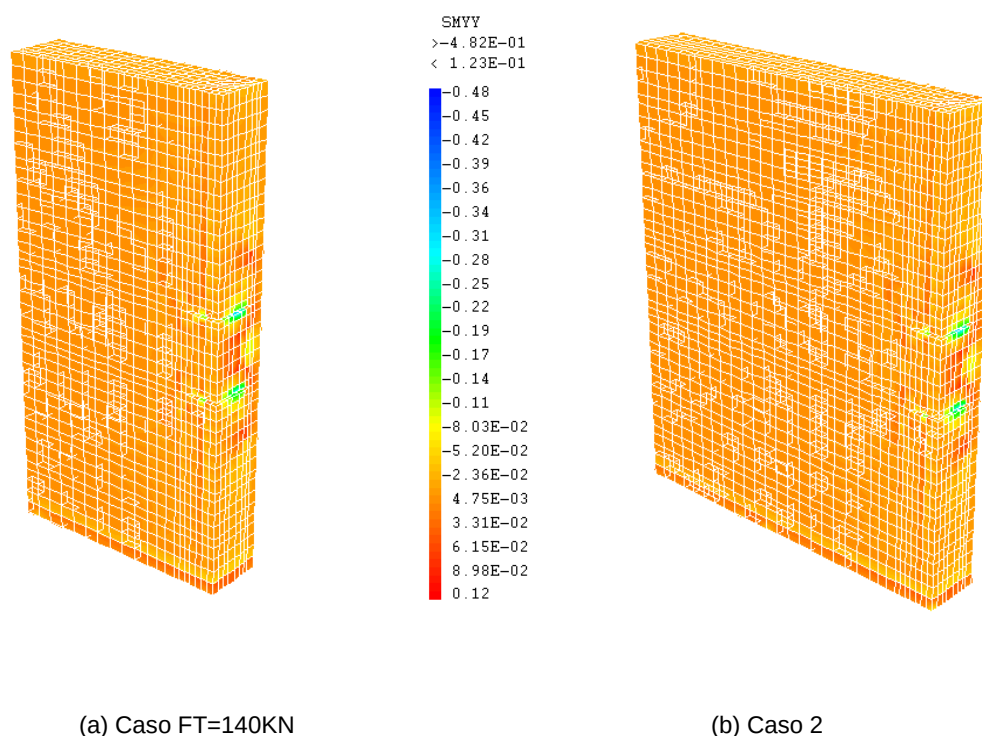
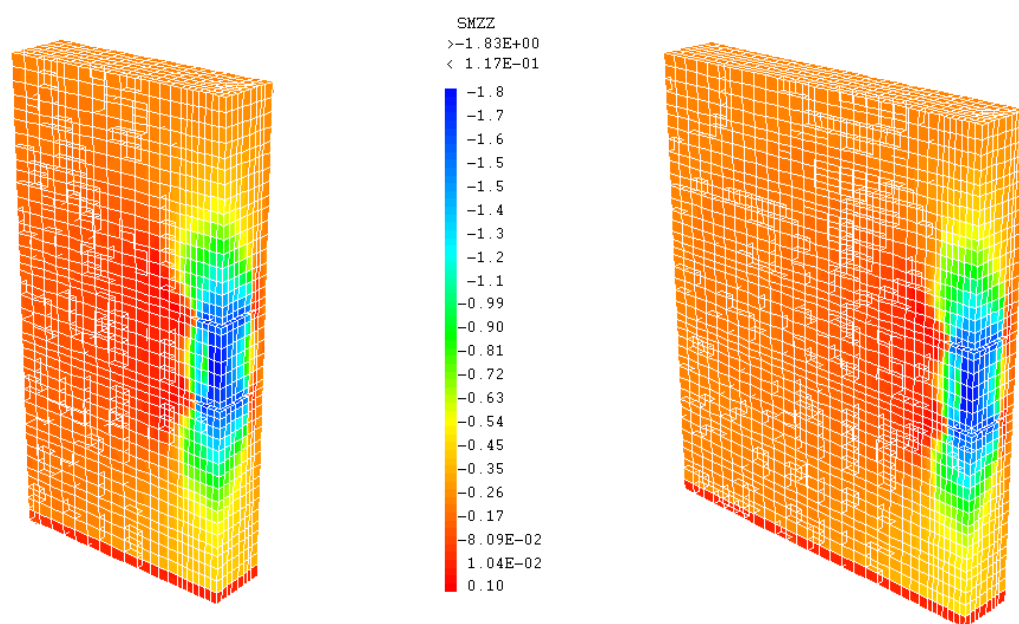


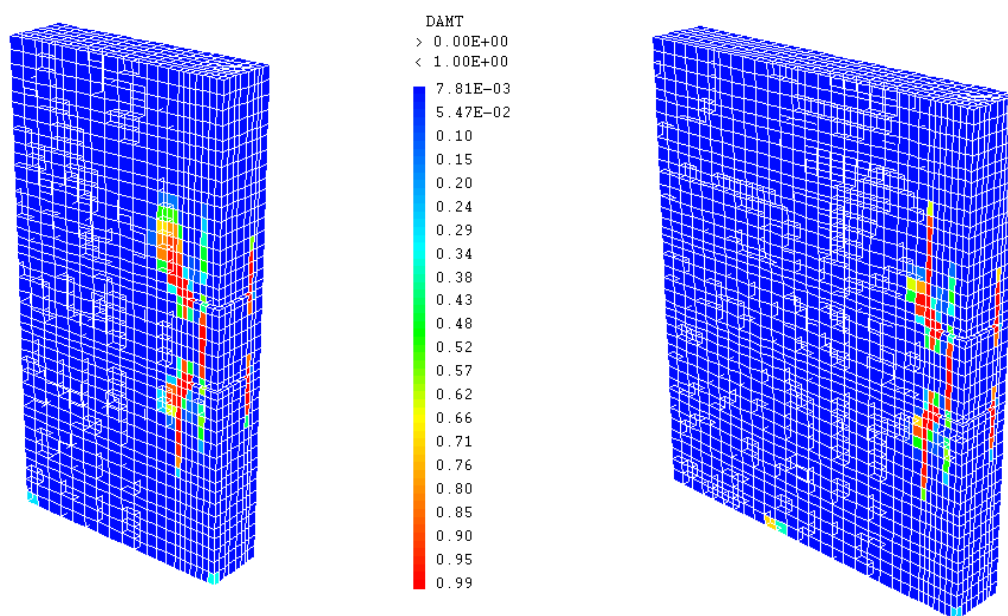
Fig.6.36. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN

(b) Caso 2

Fig.6.37. – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN
 $\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

(b) Caso 2
 $\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

Fig.6.38. – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM

No Quadro 6.30, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados para ambos os casos, não apresentam diferenças significativas.

Quadro 6.30 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso FT=140KN	Caso 2
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,429 (+ 30%)	0,427 (+ 29%)
A2+B2	0,462 (+ 40%)	0,458 (+ 39%)
A3+B3	0,480 (+ 45%)	0,475 (+ 44%)

A partir do Quadro 6.29, é possível concluir que as diferenças ao nível do campo de deformações, entre o Caso FT=140KN e o Caso 2, são mínimas.

Através da análise das tensões e da visualização dos respectivos mapas, verifica-se que o acrescento de uma fiada de parede lateral, não provoca alterações significativas nos resultados da análise.

6.7. ANÁLISE DO CASO 3

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do Caso FT=140N e o comportamento não-linear do Caso 3 da parede.

O Caso 3 é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 48 KN
- Força no Topo (FT) = 140 KN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 KN

Esta comparação de resultados será feita para a força de 63KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise do Caso FT=140KN convergiu.

No Quadro 6.31 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.31 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,14970	0,08126	0,02583	0,20217	0,11971	0,03928	-0,01268	0,00105
14	0,30027	0,16179	0,05138	0,40077	0,23738	0,07791	-0,02584	-0,01147
21	0,45195	0,24192	0,07668	0,59796	0,35388	0,11610	-0,04017	-0,02453
28	0,62417	0,33369	0,10507	0,80610	0,47850	0,15731	-0,05832	-0,04027
35	0,82031	0,44186	0,13778	1,02912	0,61466	0,20309	-0,08559	-0,06649
42	1,05240	0,57576	0,17781	1,28236	0,77486	0,25843	-0,14477	-0,13468
49	1,30991	0,72886	0,22621	1,56099	0,95477	0,32134	-0,23394	-0,23384
56	1,64486	0,91525	0,28447	1,95054	1,19782	0,40445	-0,35356	-0,36159
63	2,02754	1,13271	0,35504	2,38187	1,47220	0,49924	-0,49934	-0,51349
70	2,45756	1,36742	0,43252	2,85114	1,77281	0,60269	-0,67900	-0,69696

Em anexo, na Fig.A.13, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.18, A.19 e A.20.

Em seguida, na Fig.6.39, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

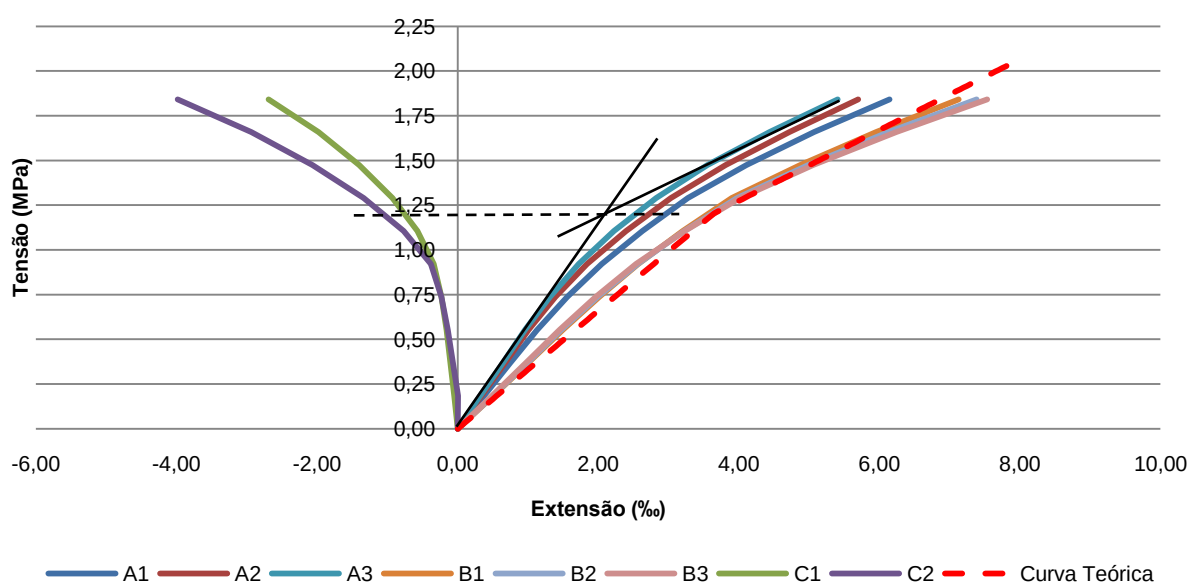


Fig.6.39 – Extensões não-lineares para a acção FM

No Quadro 6.32 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.32 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN		Caso 3	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1276	-1,4117	0,1262	-1,3800
SMYY	0,1229	-0,4797	0,1248	-0,4770
SMZZ	0,1169	-1,8261	0,1166	-1,8373

No que respeita à análise de tensões, entre o Caso FT=140KN e o Caso 3, refere-se que não se registaram diferenças significativas, como é demonstrado no quadro anterior.

No Quadro 6.33 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.33 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN	Caso 3
$D_{\text{máx}}$ (mm)	2,3651	2,3819
$A_{\text{máx}}$ (mm)	1,0110	1,4002

Nas Fig.6.40, 6.41 e 6.42, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente. Na Fig.6.43 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas.

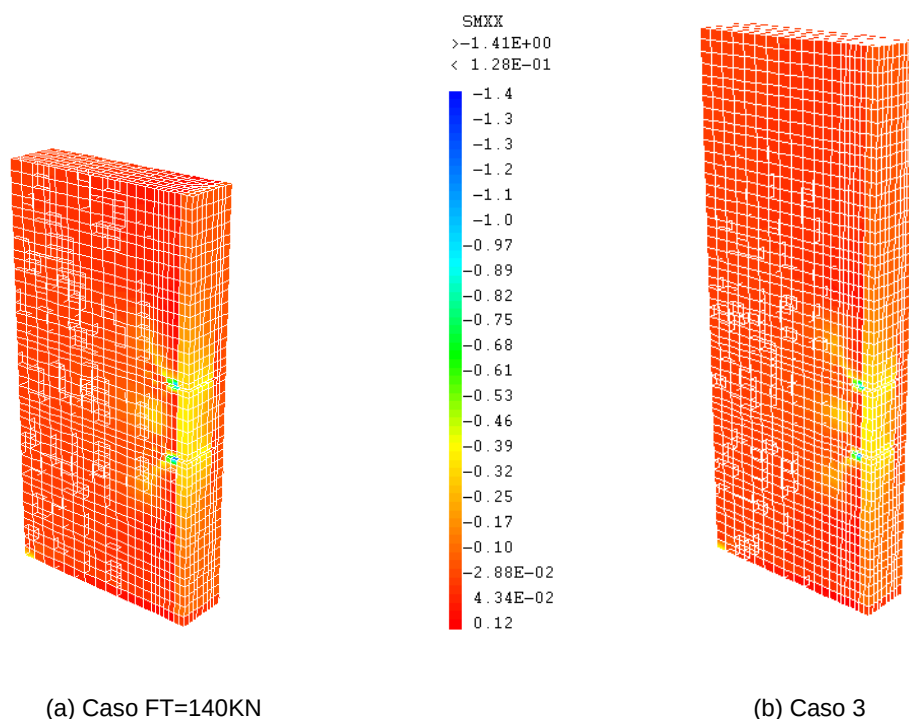


Fig.6.40. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

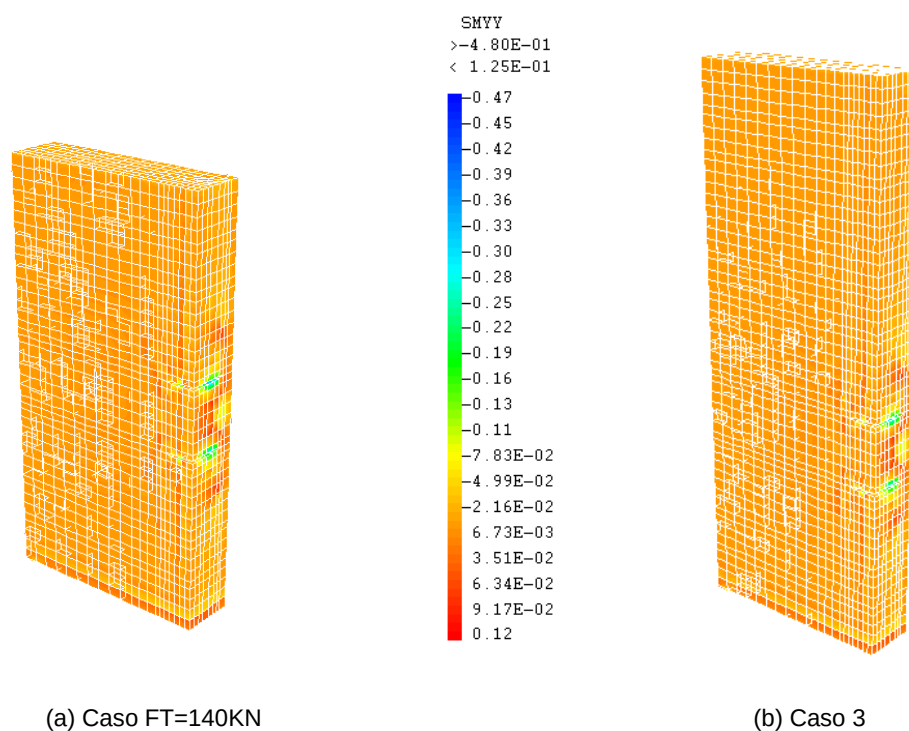
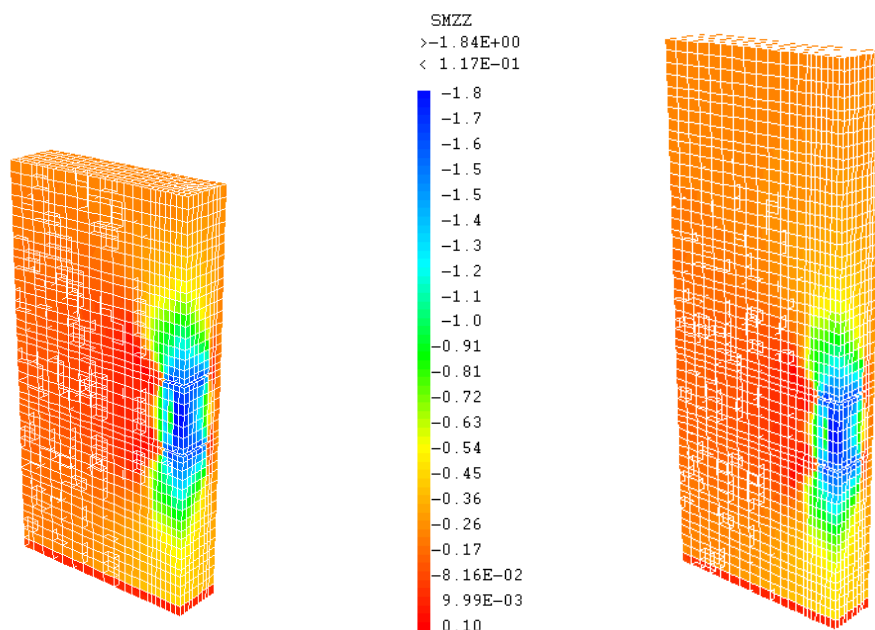


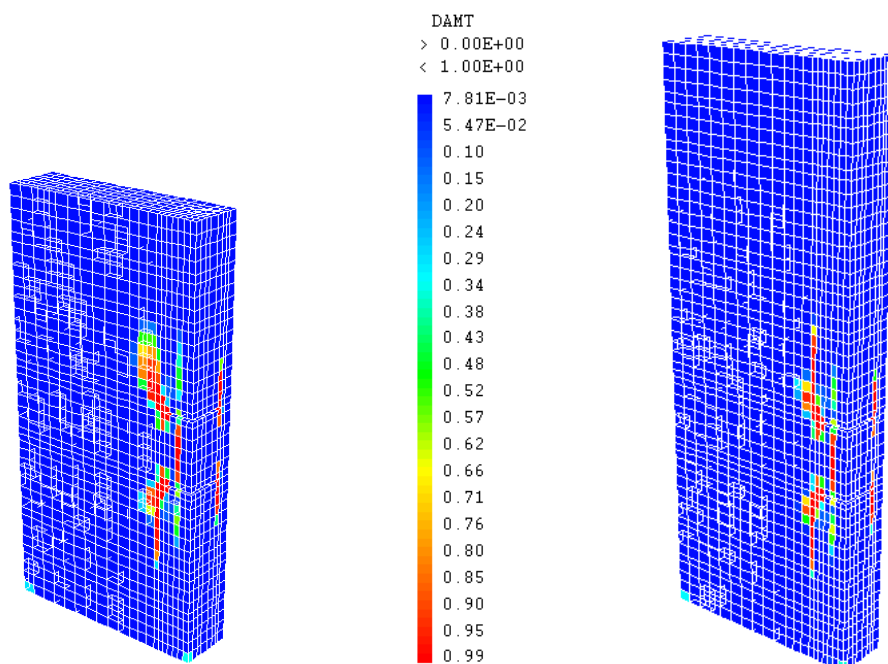
Fig.6.41. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN

(b) Caso 3

Fig.6.42. – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN

(b) Caso 3

$\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

$\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

Fig.6.43. – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM

No Quadro 6.34, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados para ambos os casos, não apresentam diferenças significativas.

Quadro 6.34 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso FT=140KN	Caso 3
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,429 (+ 30%)	0,429 (+ 30%)
A2+B2	0,462 (+ 40%)	0,462 (+ 40%)
A3+B3	0,480 (+ 45%)	0,479 (+ 45%)

No que respeita ao campo de deformações (Quadro 6.33), importa salientar que, o deslocamento máximo na altura da parede do Caso 3 é superior, em aproximadamente 40%, do valor de deslocamento da parede do Caso FT=140KN. Isto explica-se através do acréscimo de carga vertical com a fiada superior no topo da parede. Note-se que, o deslocamento $A_{máx}$ é medido apenas até à cota Z=3,0 (altura total da parede base), tanto no caso FT=140KN como no caso 3.

É importante referir que, a análise do caso 3 convergiu até à força final de 70KN nos rasgos. Este resultado deve-se ao facto de se ter colocado mais peso em cima da parede, através da fiada superior, medida que permitiu contrariar, mais eficazmente do que no Caso FT=140KN, a força ascendente nos rasgos. Este facto, também pode ser constatado através da visualização do mapa de dano em tracção da Fig.6.43, onde é possível verificar que o padrão de ruptura do Caso 3 se encontra ligeiramente menos desenvolvido que o Caso FT=140KN.

6.8. ANÁLISE DO CASO 4

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do Caso FT=140N e o comportamento não-linear do Caso 4 da parede.

O Caso 4 é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 174 kN
- Força no Topo (FT) = 140 kN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 kN

Esta comparação de resultados será feita para a força de 63kN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise do Caso FT=140kN convergiu.

No Quadro 6.35 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.35 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (kN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,15136	0,08239	0,02624	0,20269	0,12017	0,03947	-0,01315	0,00269
14	0,30345	0,16406	0,05221	0,40202	0,23840	0,07832	-0,02678	-0,01001
21	0,45637	0,24526	0,07793	0,59996	0,35550	0,11674	-0,04142	-0,02316
28	0,62871	0,33740	0,10654	0,80826	0,48025	0,15800	-0,05961	-0,03879
35	0,82331	0,44436	0,13904	1,03014	0,61552	0,20343	-0,08566	-0,06307
42	1,05166	0,57587	0,17836	1,28003	0,77306	0,25771	-0,14059	-0,12635
49	1,30371	0,72460	0,22479	1,55357	0,94908	0,31915	-0,22277	-0,21838
56	1,62687	0,90366	0,28040	1,93073	1,18315	0,39859	-0,33031	-0,33424
63	2,00233	1,09820	0,34350	2,34837	1,44579	0,48809	-0,45422	-0,46370
70	2,40001	1,31086	0,41290	2,78636	1,72395	0,58371	-0,59345	-0,60675

Em anexo, na Fig.A.14, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.21, A.22 e A.23.

Em seguida, na Fig.6.44, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

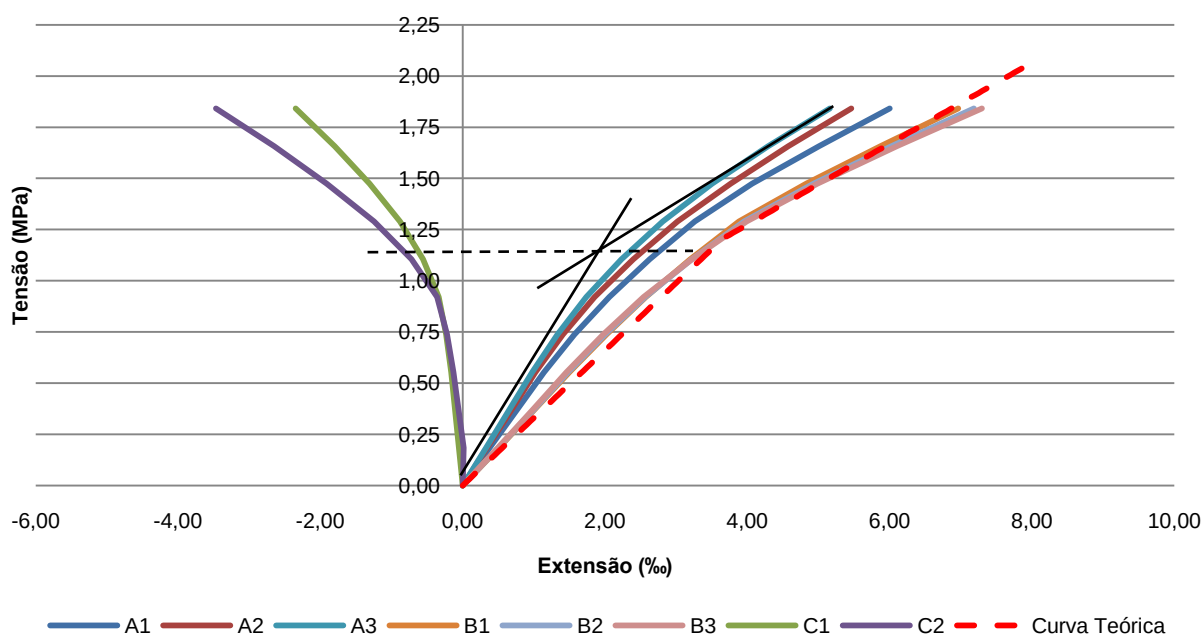


Fig.6.44 – Extensões não-lineares para a acção FM

No Quadro 6.36 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.36 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN		Caso 4	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1276	-1,4117	0,1210	-1,3962
SMYY	0,1229	-0,4797	0,1191	-0,4803
SMZZ	0,1169	-1,8261	0,1172	-1,8469

No que respeita à análise de tensões, entre o Caso FT=140KN e o Caso 4, refere-se que não se registaram diferenças significativas, como é demonstrado no quadro anterior.

No Quadro 6.37 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.37 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN	Caso 4
$D_{\text{máx}}$ (mm)	2,3651	2,3484
$A_{\text{máx}}$ (mm)	1,0110	1,7503

Nas Fig.6.45, 6.46 e 6.47, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente. Na Fig.6.48 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas.

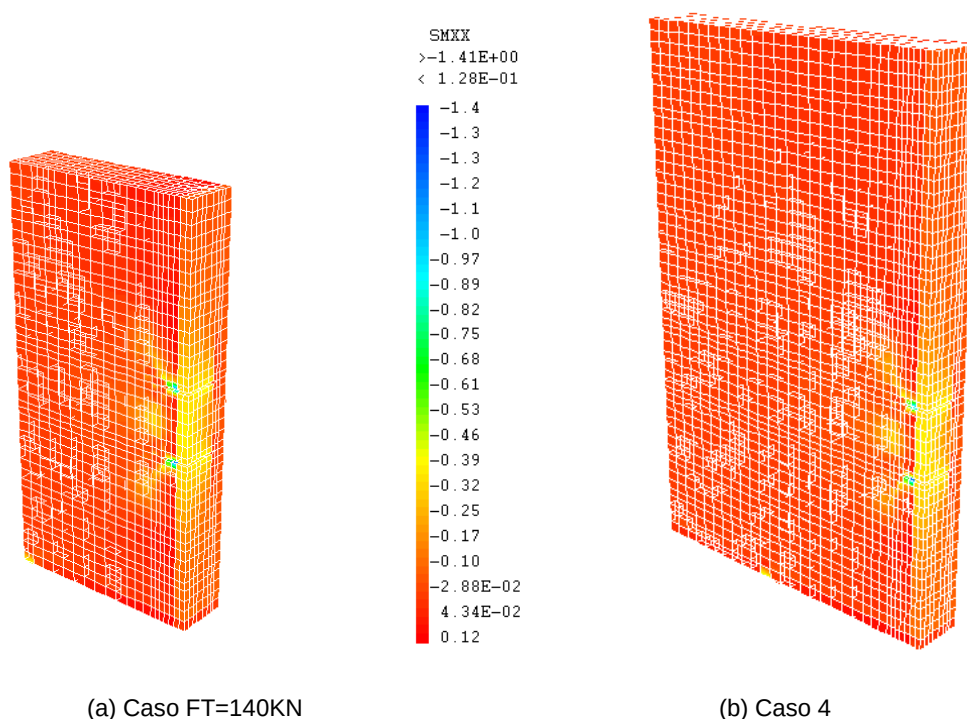


Fig.6.45 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

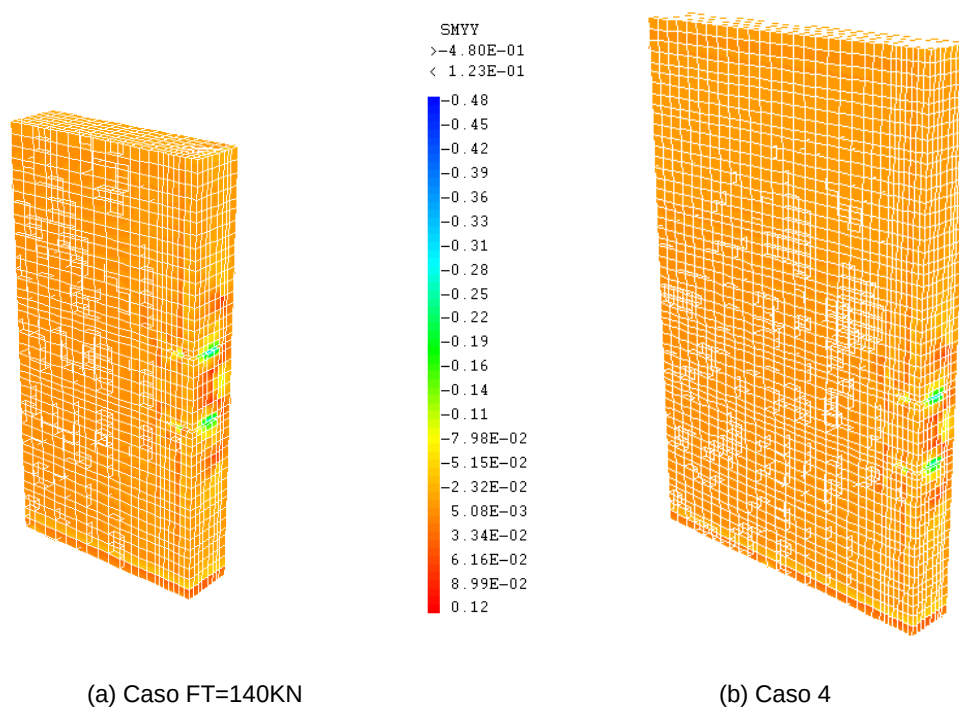
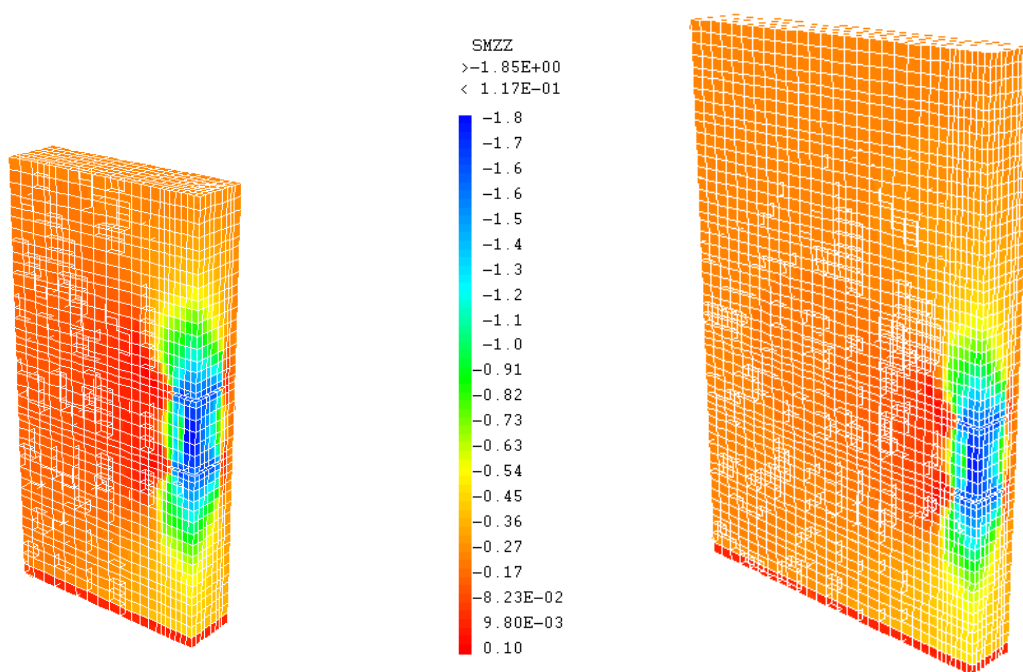


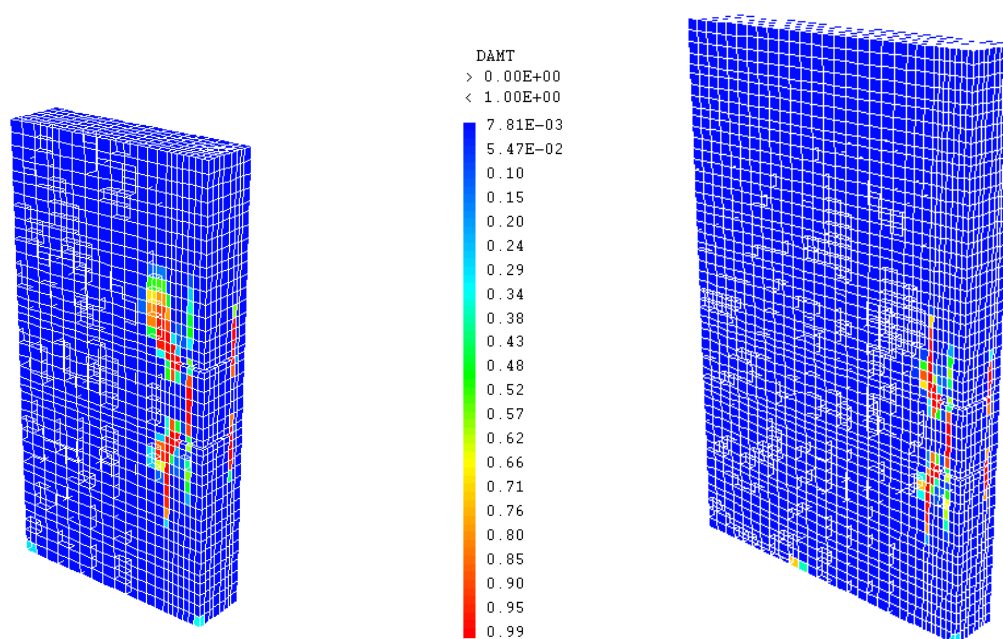
Fig.6.46 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN

(b) Caso 4

Fig.6.47 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN

$\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

(b) Caso 4

$\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

Fig.6.48 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM

No Quadro 6.38, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados para ambos os casos, não apresentam diferenças significativas.

Quadro 6.38 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso FT=140KN	Caso 4
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,429 (+ 30%)	0,426 (+ 29%)
A2+B2	0,462 (+ 40%)	0,457 (+ 38%)
A3+B3	0,480 (+ 45%)	0,473 (+ 43%)

No que respeita ao campo de deformações (Quadro 6.37), importa salientar que, o deslocamento máximo na altura da parede do Caso 4 é superior, em aproximadamente 75%, do valor de deslocamento da parede do Caso FT=140KN. Isto explica-se através do acréscimo de carga vertical com a fiada superior no topo da parede.

É importante referir que, a análise do Caso 4 também convergiu até à força final de 70KN nos rasgos, pelas mesmas razões evidenciadas para o Caso 3. Este facto, também pode ser constatado através da visualização do mapa de dano em tracção da Fig.6.48, onde é possível verificar que o padrão de ruptura do Caso 4 se encontra ligeiramente menos desenvolvido que o Caso FT=140KN.

6.9. ANÁLISE DO CASO 5

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do Caso FT=140N e o comportamento não-linear do Caso 5 da parede.

O Caso 5 é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 124 KN
- Força no Topo (FT) = 140 KN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 KN

Esta comparação de resultados será feita para a força de 63KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise do Caso FT=140KN convergiu.

No Quadro 6.39 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.39 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,15186	0,08246	0,02622	0,20123	0,11902	0,03901	-0,01193	-0,00192
14	0,30431	0,16422	0,05217	0,39934	0,23619	0,07742	-0,02430	-0,01381
21	0,45830	0,24611	0,07805	0,59698	0,35288	0,11565	-0,03745	-0,02606
28	0,63312	0,34027	0,10733	0,80650	0,47856	0,15725	-0,05416	-0,04092
35	0,82709	0,44772	0,14035	1,02775	0,61337	0,20249	-0,07675	-0,06215
42	1,05328	0,57876	0,18022	1,27611	0,76996	0,25647	-0,12426	-0,11756
49	1,30062	0,72534	0,22650	1,54486	0,94260	0,31673	-0,19548	-0,19818
56	1,60715	0,89063	0,28135	1,90518	1,16427	0,39177	-0,28384	-0,29475
63	1,96137	1,06992	0,33912	2,30323	1,41270	0,47614	-0,38441	-0,40130
70	2,33847	1,26687	0,40244	2,72364	1,67861	0,56701	-0,49964	-0,52104

Em anexo, na Fig.A.15, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.24, A.25 e A.26.

Em seguida, na Fig.6.49, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

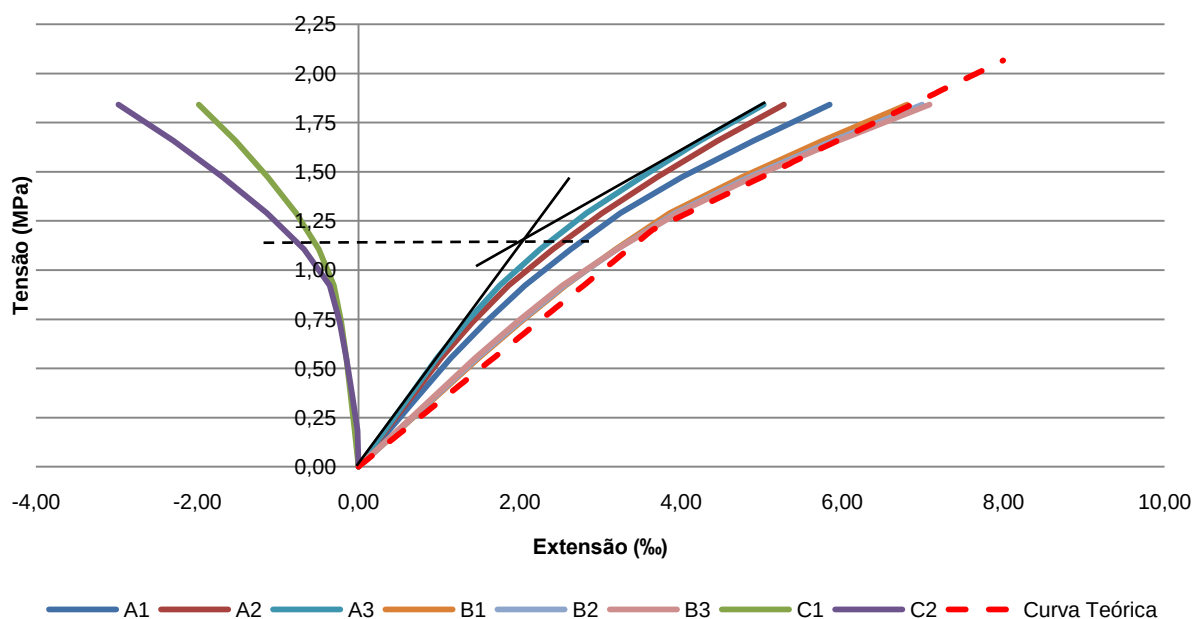


Fig.6.49 – Extensões não-lineares para a acção FM

No Quadro 6.40 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.40 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN		Caso 5	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1276	-1,4117	0,1234	-1,4575
SMYY	0,1229	-0,4797	0,1202	-0,4795
SMZZ	0,1169	-1,8261	0,1148	-1,8299

No que respeita à análise de tensões, entre o Caso FT=140KN e o Caso 5, refere-se que não se registaram diferenças significativas, como é demonstrado no quadro anterior.

No Quadro 6.41 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.41 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN	Caso 5
$D_{\text{máx}}$ (mm)	2,3651	2,3032
$A_{\text{máx}}$ (mm)	1,0110	1,3428

Nas Fig.6.50, 6.51 e 6.52, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente. Na Fig.6.53 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas.

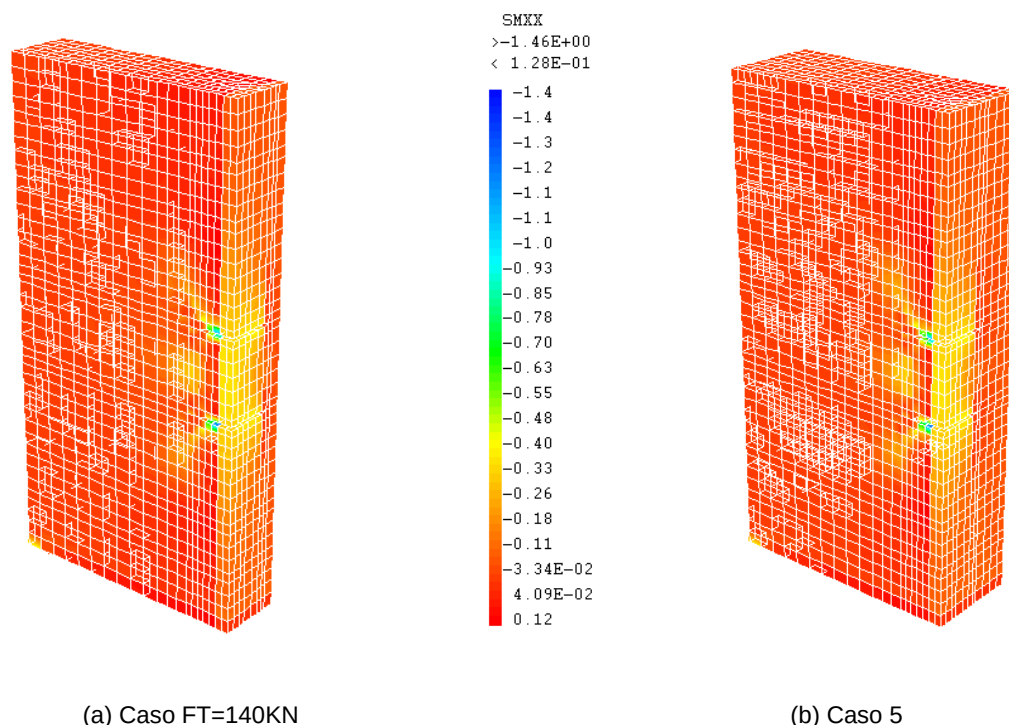


Fig.6.50. – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

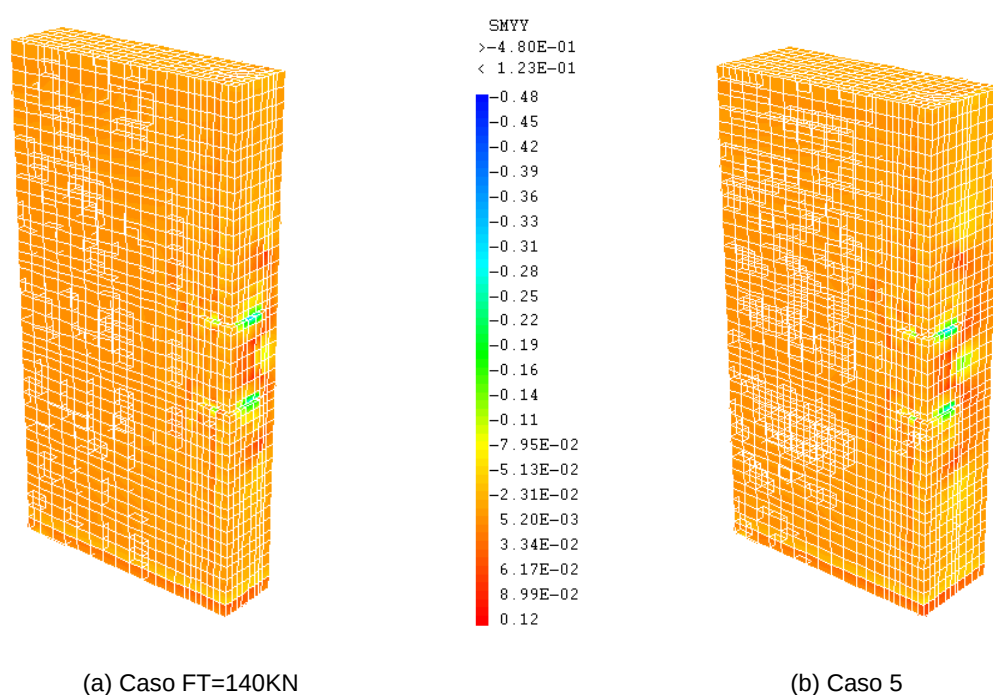
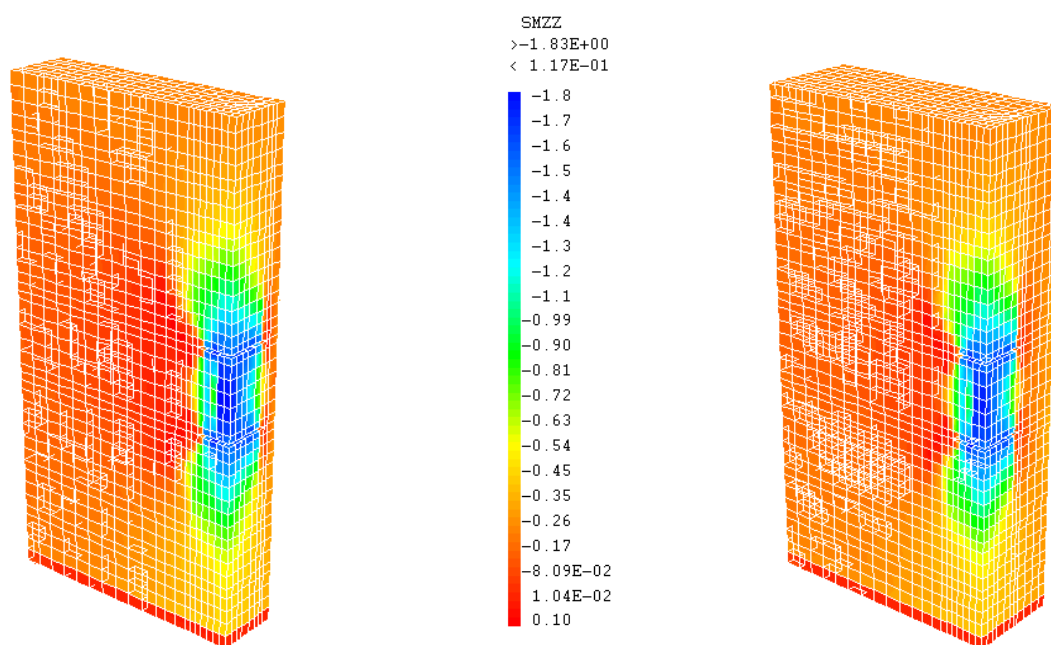


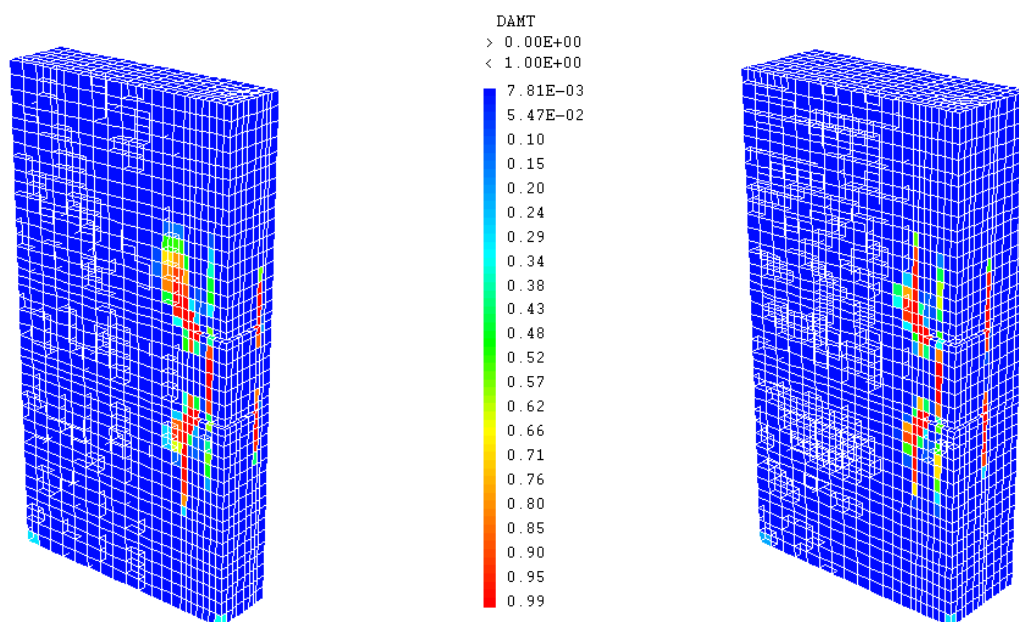
Fig.6.51. – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN

(b) Caso 5

Fig.6.52. – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM



(a) Caso FT=140KN
 $\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

(b) Caso 5
 $\sigma = 1,658 \text{ MPa}$

Fig.6.53. – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM

No Quadro 6.42, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados para ambos os casos, não apresentam diferenças significativas.

Quadro 6.42 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso FT=140KN	Caso 5
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,429 (+ 30%)	0,426 (+ 29%)
A2+B2	0,462 (+ 40%)	0,457 (+ 38%)
A3+B3	0,480 (+ 45%)	0,474 (+ 44%)

No que respeita ao campo de deformações (Quadro 6.41), refere-se que não foram registadas diferenças significativas, entre os 2 casos em análise.

É importante referir que, a análise do Caso 5 também convergiu até à força final de 70KN nos rasgos. Como neste modelo, a única alteração foi acrescentar material através da fiada traseira, conclui-se que, o facto de se ter mais material a envolver os rasgos da parede, confere um maior equilíbrio dos esforços ao material envolvente da zona dos rasgos. Este facto pode também ser constatado através da visualização do mapa de dano na Fig.6.53, onde se verifica que o padrão de ruptura do Caso 5 não se encontra tão desenvolvido como o do Caso FT=140KN.

6.10. ANÁLISE DO CASO 6

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa entre o comportamento não-linear do Caso FT=140N e o comportamento não-linear do Caso 6 da parede.

O Caso 6 é caracterizado pelas seguintes acções:

- Peso Próprio (PP) = 142 KN
- Força no Topo (FT) = 140 KN
- Força nos Rasgos (FM) = 70 KN

Esta comparação de resultados será feita para a força de 63KN nos rasgos visto que foi o último incremento para o qual a análise do Caso FT=140KN convergiu.

No Quadro 6.43 apresentam-se os deslocamentos não-lineares medidos nos diferentes LVDTs, para a acção da força nos rasgos.

Quadro 6.43 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (mm)

F (KN)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
7	0,15197	0,08285	0,02636	0,20200	0,11949	0,03916	-0,01205	-0,00105
14	0,30478	0,16506	0,05247	0,40076	0,23714	0,07775	-0,02449	-0,01299
21	0,45792	0,24660	0,07828	0,59800	0,35357	0,11589	-0,03770	-0,02524
28	0,62910	0,33833	0,10682	0,80528	0,47749	0,15680	-0,05385	-0,03963
35	0,81950	0,44261	0,13886	1,02424	0,61049	0,20134	-0,07533	-0,05942
42	1,04210	0,57105	0,17773	1,26965	0,76466	0,25433	-0,12012	-0,11165
49	1,28913	0,71693	0,22323	1,53860	0,93752	0,31470	-0,19098	-0,19272
56	1,59711	0,88349	0,27846	1,90064	1,16074	0,39036	-0,27952	-0,28992
63	1,95261	1,06420	0,33690	2,30066	1,41075	0,47534	-0,38056	-0,39752
70	2,33120	1,26271	0,40138	2,72175	1,67710	0,56634	-0,49546	-0,51694

Em anexo, na Fig.A.16, pode ser observado o gráfico de relação não-linear Força/Deslocamento, sob a acção da força nos rasgos.

Os valores obtidos nas extensões não-lineares, para a acção da força nos rasgos, podem ser encontrados em anexo nos Quadros A.27, A.28 e A.29.

Em seguida, na Fig.6.54, apresenta-se o gráfico de relação não-linear Tensão/Extensão, para a acção da força nos rasgos.

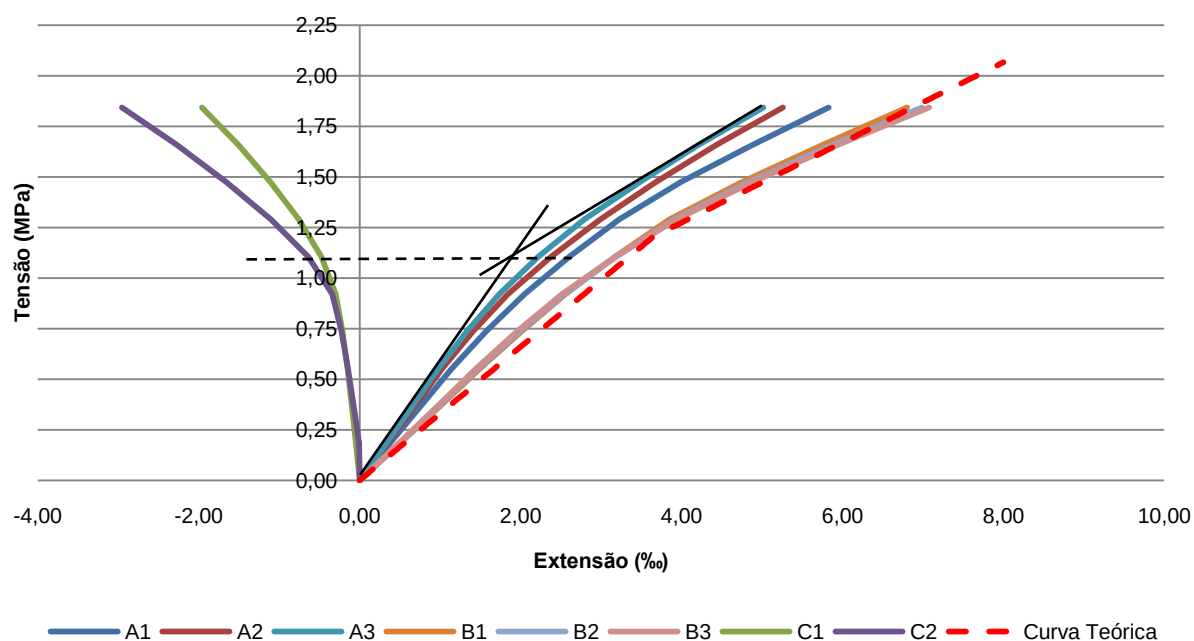


Fig.6.54 – Extensões não-lineares para a acção FM

No Quadro 6.44 apresentam-se as tensões máximas e mínimas atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.44 – Tensões Gerais Limite para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN		Caso 6	
	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)	Tracção (MPa)	Compressão (MPa)
SMXX	0,1276	-1,4117	0,1242	-1,4247
SMYY	0,1229	-0,4797	0,1190	-0,4766
SMZZ	0,1169	-1,8261	0,1055	-1,8236

No que respeita à análise de tensões, entre o Caso FT=140KN e o Caso 6, refere-se que não se registaram diferenças significativas, como é demonstrado no quadro anterior.

No Quadro 6.45 apresentam-se os deslocamentos máximos atingidas em ambas as análises, para a acção do peso próprio, da força no topo da parede e da força nos rasgos.

Quadro 6.45 – Deslocamentos Máximos para a acção PP+FT+FM

	Caso FT=140KN	Caso 6
D _{máx} (mm)	2,3651	2,3007
A _{máx} (mm)	1,0110	1,6870

Nas Fig.6.55, 6.56 e 6.57, são apresentados os mapas de tensões gerais segundo XX, YY e ZZ, respectivamente. Na Fig.6.58 apresenta-se o mapa de dano de tracção, para ambas as análises efectuadas.

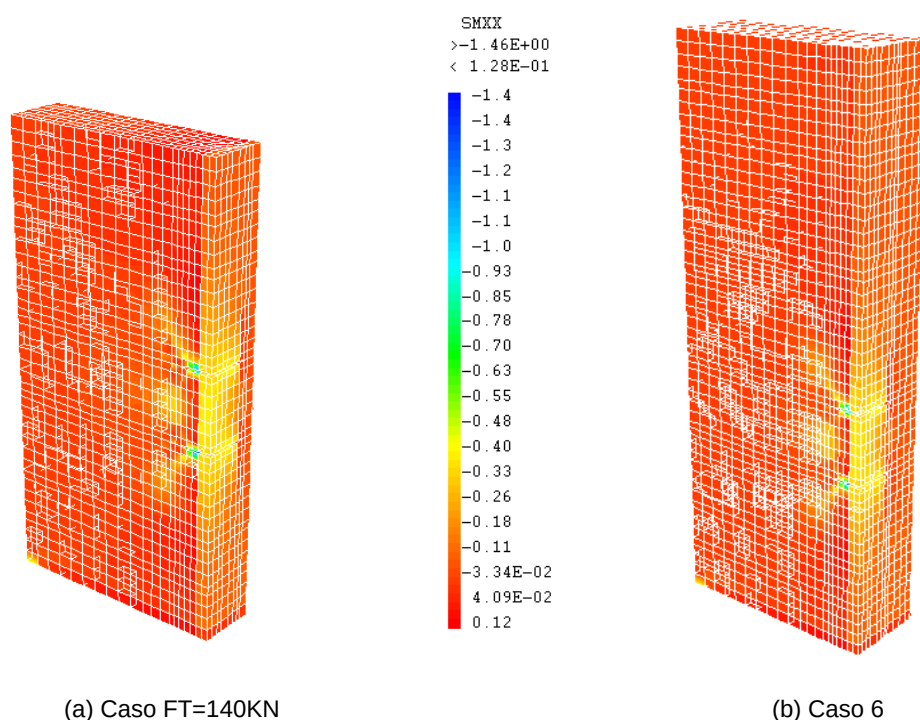


Fig.6.55 – Mapa de Tensões Gerais segundo XX devido à acção PP+FT+FM

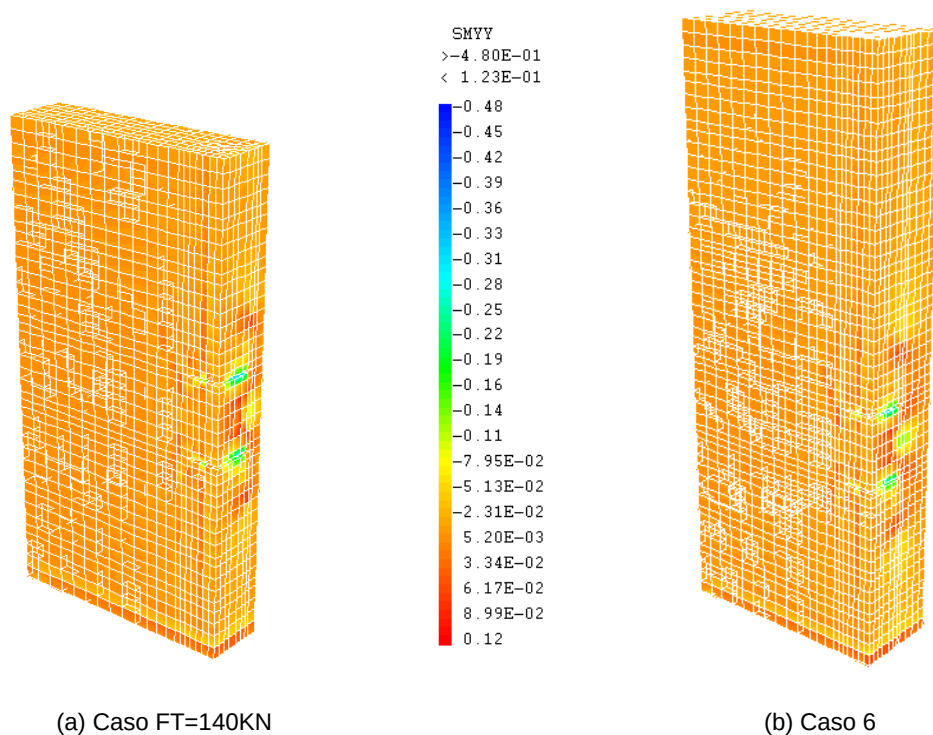


Fig.6.56 – Mapa de Tensões Gerais segundo YY devido à acção PP+FT+FM

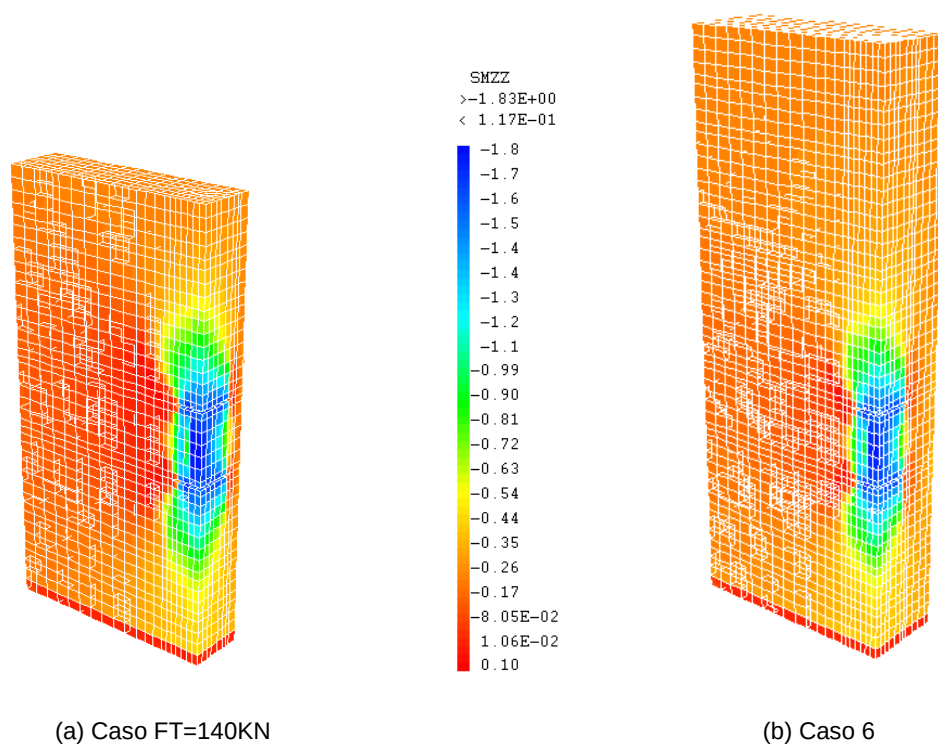


Fig.6.57 – Mapa de Tensões Gerais segundo ZZ devido à acção PP+FT+FM

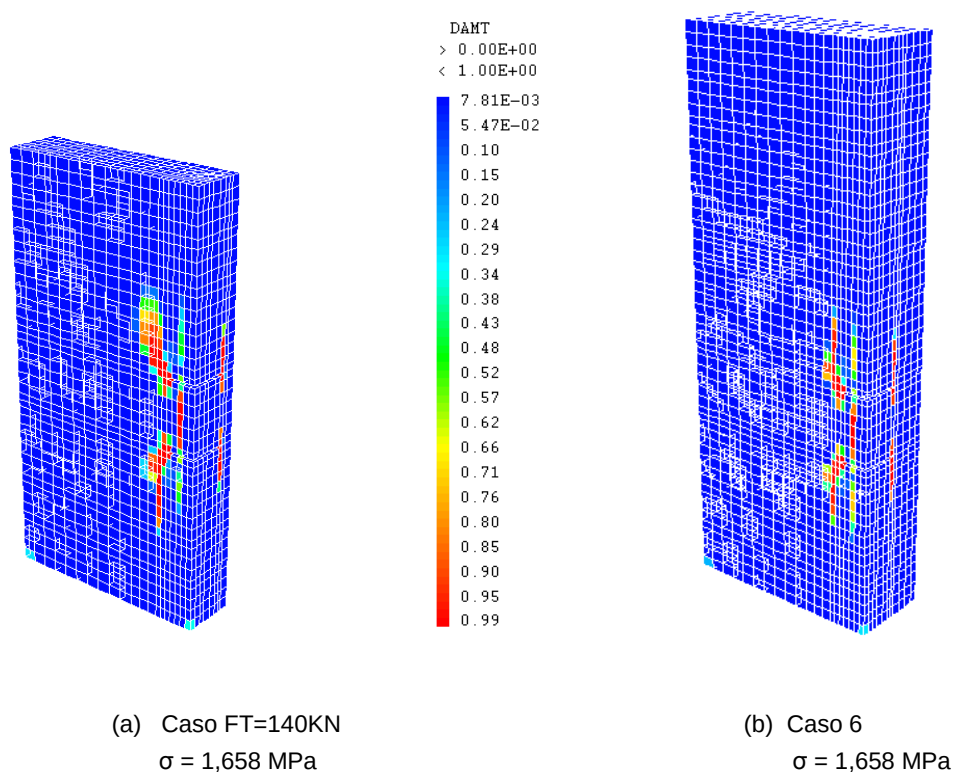


Fig.6.58 – Mapa de Dano de Tracção devido à acção PP+FT+FM

No Quadro 6.46, resumem-se os valores médios dos módulos de deformabilidade estimados em ambas as análises efectuadas, para a acção da força nos rasgos. Note-se que, os valores registados para ambos os casos, não apresentam diferenças significativas.

Quadro 6.46 – Valores médios de deformabilidade para a acção FM

LVDTs	Caso FT=140KN	Caso 6
	E_{med} (GPa)	E_{med} (GPa)
A1+B1	0,429 (+ 30%)	0,426 (+ 29%)
A2+B2	0,462 (+ 40%)	0,456 (+ 38%)
A3+B3	0,480 (+ 45%)	0,473 (+ 43%)

No que respeita ao campo de deformações (Quadro 6.45), importa salientar que, o deslocamento máximo na altura da parede do Caso 6 é superior, em aproximadamente 70%, do valor de deslocamento da parede do Caso FT=140KN. Isto explica-se através do acréscimo de carga vertical com a fiada superior no topo da parede, e também através da fiada traseira que confere um maior equilíbrio dos esforços ao material envolvente da zona dos rasgos.

É importante referir que, a análise do Caso 6 também convergiu até à força final de 70KN nos rasgos, pelas mesmas razões evidenciadas para o Caso 3 e 4. Este facto, também pode ser constatado através da visualização do mapa de dano em tracção da Fig.6.58, onde é possível verificar que o padrão de ruptura do Caso 6 se encontra ligeiramente menos desenvolvido que o Caso FT=140KN.

6.11. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE (FT = 280KN)

A análise do comportamento não-linear do caso base, com uma força de 280KN no topo da parede e uma força de 140KN nos rasgos, foi efectuada neste trabalho, mas não será aqui desenvolvida pois a sua análise não convergiu para valores superiores à força de 70KN nos rasgos (50% da força total), e a sua introdução neste ponto seria uma repetição da informação já recolhida. De qualquer modo será feito um breve resumo das análises efectuadas, para o caso base da parede, com diferentes aplicações de carga.

No Quadro 6.47 apresenta-se um resumo dos valores atingidos para as diferentes aplicações de carga no caso base da parede.

Quadro 6.47 – Quadro Resumo das diferentes aplicações de carga.

FORÇA/TENSÃO ATINGIDA NOS RASGOS (Análise Não-Linear)	
CASO BASE (FT=70KN)	FM = 49 KN
$\sigma = 0,117 \text{ MPa}$	$\sigma = 1,289 \text{ MPa}$
CASO FT=140KN	FM = 63 KN
$\sigma = 0,233 \text{ MPa}$	$\sigma = 1,658 \text{ MPa}$
CASO FT=280KN	FM = 70 KN
$\sigma = 0,467 \text{ MPa}$	$\sigma = 1,842 \text{ MPa}$

O que se pode concluir uma vez mais é que, o facto de termos mais carga ou peso em cima da parede permite que o material apresente um melhor comportamento não-linear, convergindo para esforços maiores na zona dos rasgos. Isto faz sentido, na medida em que, qualquer força descendente no topo da parede, contraria a força ascendente no rasgo superior da parede, que quanto mais elevada, maior a tendência para se verificar o destacamento da parcela de parede acima dos rasgos.

6.12. RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Terminada a apresentação dos resultados obtidos para os diferentes casos de estudo considerados, resumem-se no Quadro 6.48, as principais observações registadas na simulação numérica desenvolvida.

Quadro 6.48 – Resumo das principais observações registadas.

CASOS DE ESTUDO	CASO DE COMPARAÇÃO	OBSERVAÇÕES
CASO BASE	LINEAR / NÃO-LINEAR	- Os módulos de deformabilidade estimados não apresentam diferenças significativas - Tensões de compressão sem diferenças significativas; - As Tensões de tracção apresentaram diferenças significativas, condicionadas pela lei de comportamento não-linear.
CASO DAS PLACAS RÍGIDAS	LINEAR / NÃO-LINEAR	Os respectivos módulos de deformabilidade estimados, sob comportamento linear são ligeiramente superiores aos obtidos na análise não-linear.
	CASO BASE	- As tensões gerais não apresentam diferenças significativas; - A alteração mais óbvia, com a introdução de placas rígidas, foi a maior uniformidade das extensões verticais obtidas.
CASO FT = 140KN	CASO BASE	A introdução de uma carga mais elevada no topo da parede conferiu uma melhor distribuição da força nos rasgos ao longo da parede, permitindo-lhe convergir para valores mais elevados.
CASO 2	CASO FT=140KN	A introdução de blocos laterais na parede não traduziu alterações significativas no comportamento do modelo numérico.
CASO 3	CASO FT=140KN	- Observações semelhantes às retiradas do Caso FT=140KN; - A introdução de blocos superiores na parede permitiu que o modelo convergisse para cargas mais elevadas nos rasgos, apresentando um padrão de ruptura menos desenvolvido.
CASO 4	CASO FT=140KN	- Observações semelhantes ao conjunto dos Casos 2 e 3; - A introdução de blocos laterais na parede não provoca alterações significativas, enquanto os blocos superiores no topo da parede permitem melhorar o comportamento material da parede.
CASO 5	CASO FT=140KN	- Observações semelhantes às recolhidas para o Caso 3; - A introdução de blocos posteriores na parede permitiu que o modelo convergisse para cargas mais elevadas nos rasgos, apresentando um padrão de ruptura menos desenvolvido.
CASO 6	CASO FT=140KN	- Observações semelhantes ao conjunto dos Casos 3 e 5; - A introdução de blocos superiores e posteriores na parede permitem melhorar o comportamento material da parede.
CASO FT = 280KN	BASE + FT=140KN	- Reforçou-se a observação retirada do Caso FT=140KN; - A introdução de uma carga mais elevada no topo da parede conferiu uma melhor distribuição da força nos rasgos ao longo da parede, permitindo-lhe convergir para valores mais elevados.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Terminada a exposição dos resultados obtidos na presente dissertação, apresentam-se em seguida as principais conclusões retiradas da análise global do estudo efectuado.

Tal como foi dito no final do último capítulo, uma das grandes conclusões que se retirou do presente estudo, foi que, o facto de termos mais carga ou peso em cima da parede, ou até mesmo mais material na parte traseira da parede para resistir aos esforços, permite que o material apresente um melhor comportamento não-linear, convergindo para cargas mais elevadas. Com isto conclui-se ainda que, se uma determinada carga no topo da parede for garantida, a ruptura do material será dada pela resistência da amostra entre os rasgos e condicionada pelos caminhos de ruptura desenvolvidos a partir dos rasgos, tal como foi possível verificar.

É importante rematar que, com excepção do Caso das Placas Rígidas, todos os restantes casos analisados neste trabalho, para o comportamento não-linear, apresentaram valores de módulo de deformabilidade muito próximos, mas sempre com uma margem de acréscimo média de 40% relativamente ao módulo arbitrado inicialmente.

Em relação ao modelo de comportamento não-linear utilizado, verificou-se que todas as análises efectuadas apresentaram dano máximo em tracção ($d^+ = 1,0$), concluindo-se que o modelo começa por apresentar os primeiros sinais de ruptura nas zonas de extremidade dos rasgos, sucedendo-se, com os incrementos de carga, o desvio dos respectivos caminhos de ruptura através de alinhamentos diagonais ao longo da parede.

De uma forma geral, a variação geométrica da parede, não trouxe diferenças significativas às tensões desenvolvidas ou até mesmo ao campo de deformações. Verificou-se apenas uma melhoria de comportamento da parede, pelo facto de ter mais material para resistir aos esforços que caracterizam este tipo de ensaios.

Em desenvolvimentos futuros sugere-se que seja considerada uma modelação em que os elementos pedra e argamassa se encontrem discretizados na malha de elementos finitos. Esta modelação deverá ter em conta os parâmetros da norma, atendendo sobretudo à regularidade ou não das pedras e suas respectivas dimensões. A forma e dimensão dos macacos planos são também factores que podem ser variados, com potencial contributo para esta matéria. Sugere-se também que seja simulado numericamente o Ensaio Simples de Macacos Planos, com o objectivo de verificar a diferença de resultados ao nível das tensões, relativamente ao Ensaio Duplo.

A

ANEXO

A.1. MODELAÇÃO DA MALHA

Quadro A.1 – Nº de Elementos Hexaédricos de cada bloco da Pared.

Ficheiro	Nº Elementos	Ficheiro	Nº Elementos
bloco_01	910	bloco_T01	390
bloco_02	845	bloco_T02	273
bloco_06	910	bloco_T06	390
bloco_11	975	bloco_T11	315
bloco_14	1050	bloco_T14	450
bloco_16	1050	bloco_T16	450
bloco_21	910	bloco_T21	390
bloco_22	845	bloco_T22	273
bloco_26	910	bloco_T26	390
bloco_31	910	bloco_T31	390
bloco_32	845	bloco_T32	273
bloco_36	910	bloco_T36	390
bloco_L2122	135	bloco_X2122	51
bloco_L26	70	bloco_X26	30
bloco_L3132	135	bloco_X3132	51
bloco_L36	70	bloco_X36	30
bloco_FJ1	899	bloco_FJ2	76

36	31	32
26	21	22
16	14	11
06	01	02

Fig.A.1. – Numeração dos Blocos da Parede (Vista de Alçado Frontal)

A.2. MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

Quadro A.2 – Comprimentos das bases de medição

PONTOS	X	Y	Z
A1	2,3687	1,0	1,70
A2	2,3687	1,0	1,62
A3	2,3687	1,0	1,54
A4	2,3687	1,0	1,46
A5	2,3687	1,0	1,38
A6	2,3687	1,0	1,30
B1	2,4562	1,0	1,70
B2	2,4562	1,0	1,62
B3	2,4562	1,0	1,54
B4	2,4562	1,0	1,46
B5	2,4562	1,0	1,38
B6	2,4562	1,0	1,30
C1	2,2475	1,0	1,54
C2	2,3250	1,0	1,54
C3	2,4125	1,0	1,54
C4	2,5000	1,0	1,54
D1	2,2475	1,0	1,46
D2	2,3250	1,0	1,46
D3	2,4125	1,0	1,46
D4	2,5000	1,0	1,46

A.3. ANÁLISE DO CASO BASE DA PAREDE

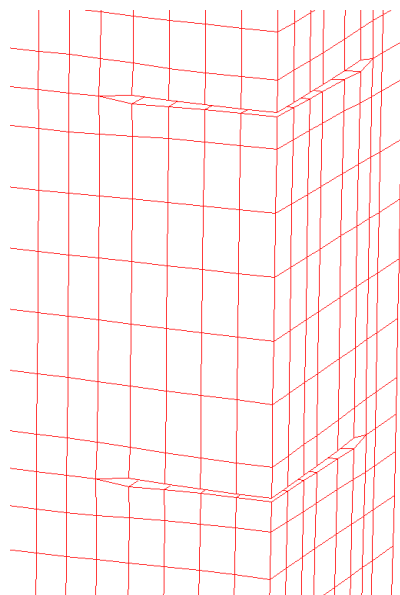
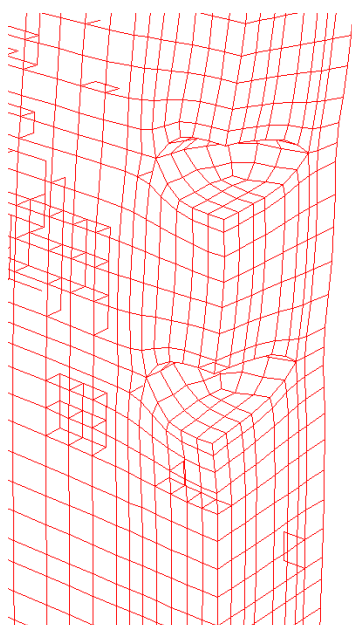
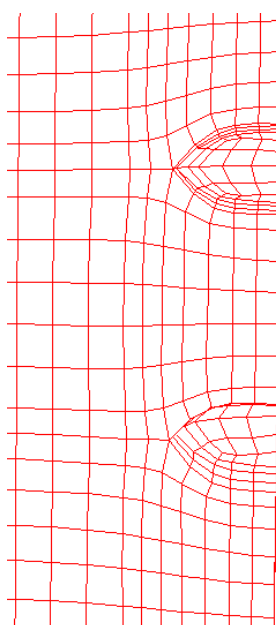


Fig.A.2. – Pormenor da deformada da parede entre os rasgos para a acção PP+FT



(a) Vista em Perspectiva



(b) Vista em Alçado Frontal

Fig.A.3 – Pormenor da deformada da parede entre os rasgos para a acção PP+FT+FM

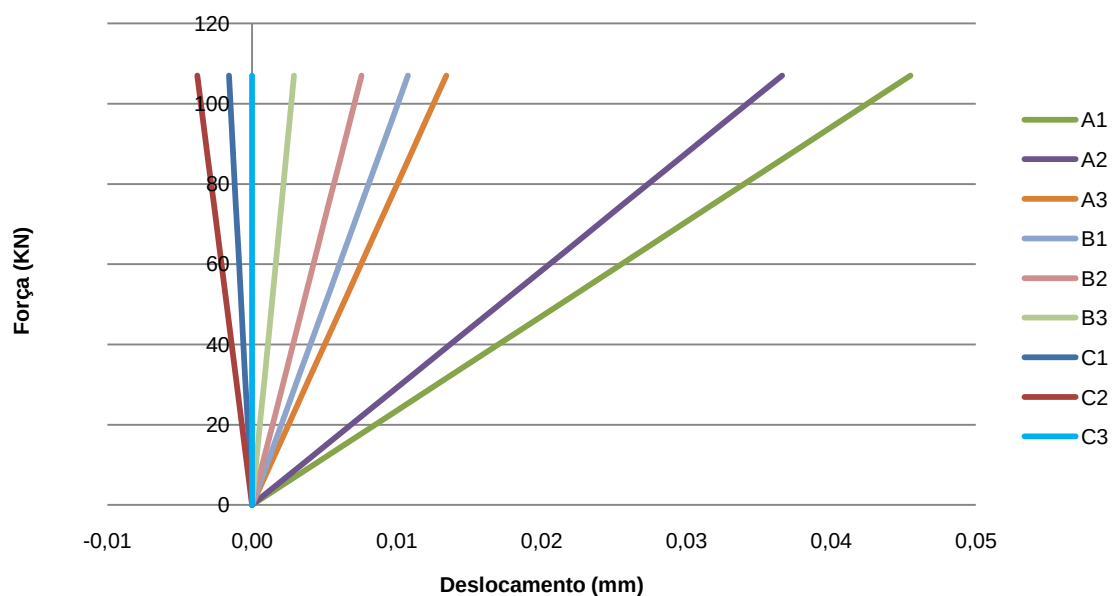


Fig.A.4. – Deslocamentos lineares para a acção PP+FT

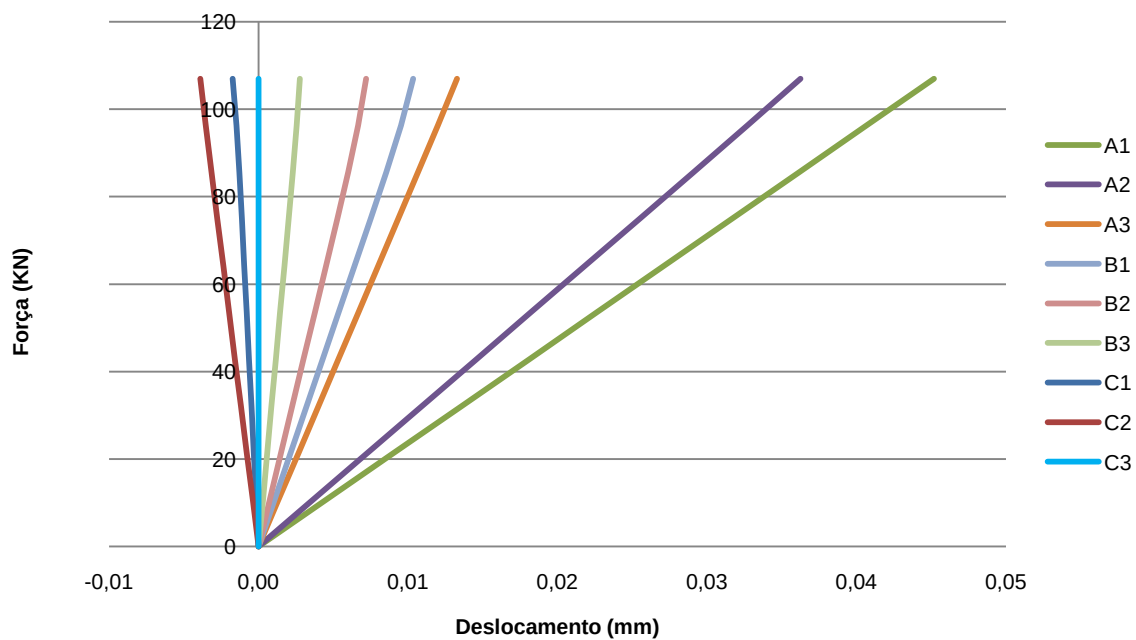


Fig.A.5. – Deslocamentos não-lineares para a acção PP+FT

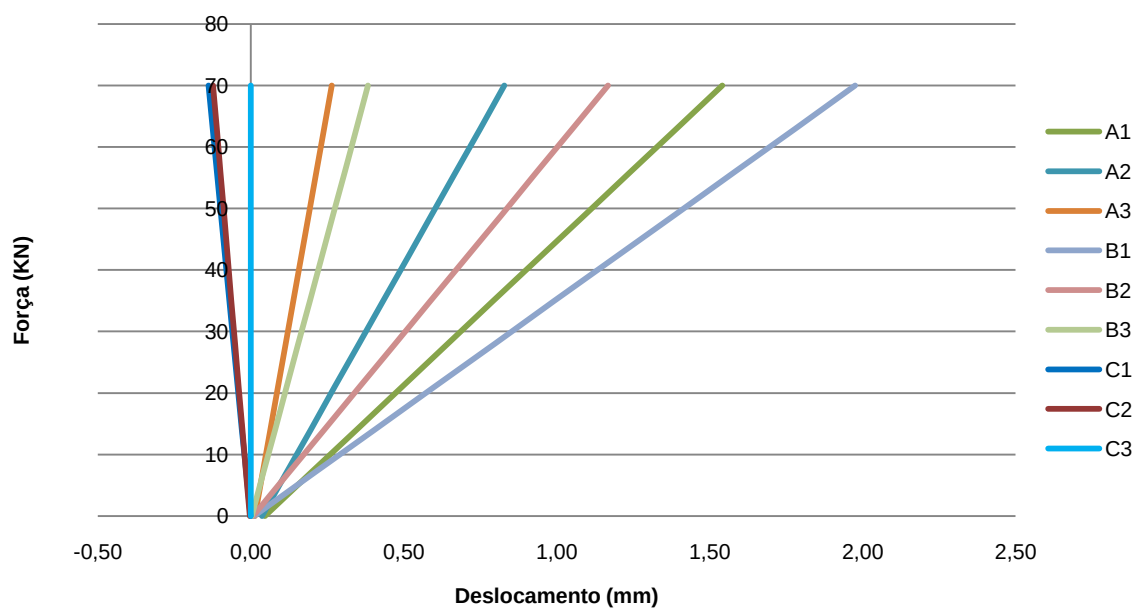


Fig.A.6. – Deslocamentos lineares para a acção FM

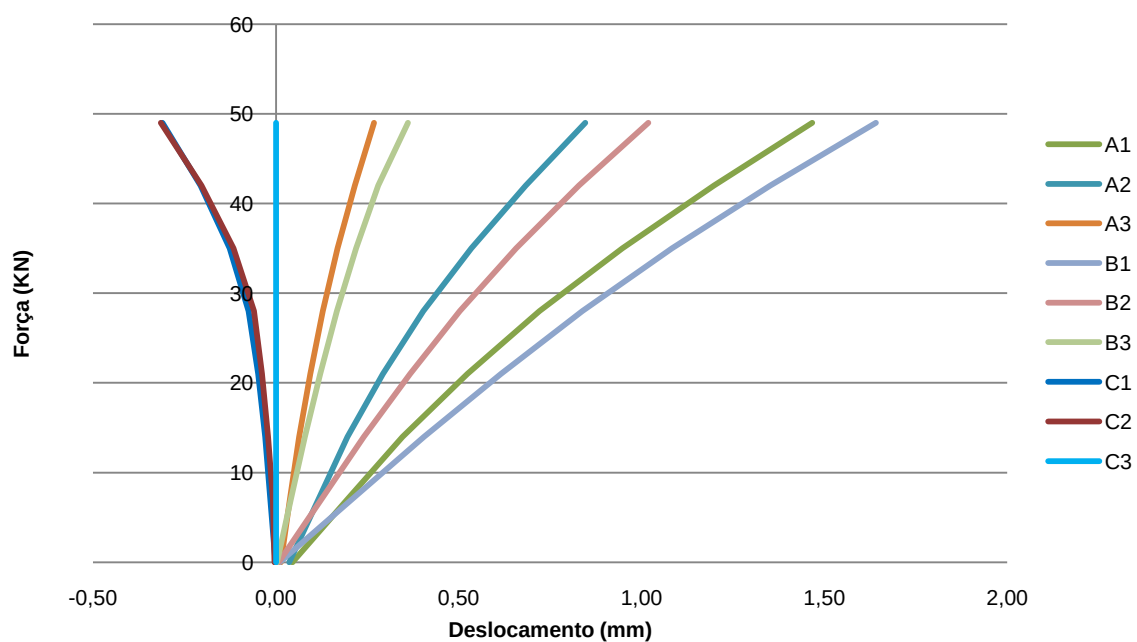


Fig.A.7 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM

Quadro A.3 – Extensões não-lineares verticais para a acção PP+FT (Base A)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,005	0,011	0,018
		21,4	0,009	0,023	0,036
		32,1	0,014	0,034	0,054
		42,8	0,018	0,045	0,071
		53,5	0,023	0,057	0,089
		64,2	0,027	0,068	0,107
		74,9	0,032	0,079	0,125
		85,6	0,036	0,090	0,143
		96,3	0,041	0,102	0,161
		107	0,045	0,113	0,178
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,004	0,015	0,018
		21,4	0,007	0,030	0,036
		32,1	0,011	0,046	0,054
		42,8	0,015	0,061	0,071
		53,5	0,018	0,076	0,089
		64,2	0,022	0,091	0,107
		74,9	0,025	0,106	0,125
		85,6	0,029	0,121	0,143
		96,3	0,033	0,136	0,161
		107	0,036	0,151	0,178
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,001	0,017	0,018
		21,4	0,003	0,033	0,036
		32,1	0,004	0,050	0,054
		42,8	0,005	0,067	0,071
		53,5	0,007	0,083	0,089
		64,2	0,008	0,100	0,107
		74,9	0,009	0,117	0,125
		85,6	0,011	0,133	0,143
		96,3	0,012	0,150	0,161
		107	0,013	0,166	0,178

Quadro A.4 – Extensões não-lineares verticais para a acção PP+FT (Base B)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,001	0,003	0,018
		21,4	0,002	0,005	0,036
		32,1	0,003	0,008	0,054
		42,8	0,004	0,011	0,071
		53,5	0,005	0,013	0,089
		64,2	0,006	0,016	0,107
		74,9	0,007	0,019	0,125
		85,6	0,009	0,021	0,143
		96,3	0,010	0,024	0,161
		107	0,010	0,026	0,178
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,001	0,003	0,018
		21,4	0,002	0,006	0,036
		32,1	0,002	0,009	0,054
		42,8	0,003	0,013	0,071
		53,5	0,004	0,016	0,089
		64,2	0,005	0,019	0,107
		74,9	0,005	0,022	0,125
		85,6	0,006	0,025	0,143
		96,3	0,007	0,028	0,161
		107	0,007	0,030	0,178
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,000	0,004	0,018
		21,4	0,001	0,007	0,036
		32,1	0,001	0,011	0,054
		42,8	0,001	0,014	0,071
		53,5	0,001	0,018	0,089
		64,2	0,002	0,022	0,107
		74,9	0,002	0,025	0,125
		85,6	0,002	0,029	0,143
		96,3	0,003	0,032	0,161
		107	0,003	0,035	0,178

Quadro A.5 – Extensões não-lineares horizontais para a acção PP+FT

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε (‰)	σ (MPa)
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,000	0,001	0,018
		21,4	0,000	0,001	0,036
		32,1	0,000	0,002	0,054
		42,8	0,001	0,003	0,071
		53,5	0,001	0,003	0,089
		64,2	0,001	0,004	0,107
		74,9	0,001	0,004	0,125
		85,6	0,001	0,005	0,143
		96,3	0,001	0,006	0,161
		107	0,002	0,007	0,178
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε (‰)	σ (MPa)
C2	175	0	0,000	0,000	0,000
		10,7	0,000	0,002	0,018
		21,4	0,001	0,005	0,036
		32,1	0,001	0,007	0,054
		42,8	0,002	0,009	0,071
		53,5	0,002	0,011	0,089
		64,2	0,002	0,014	0,107
		74,9	0,003	0,016	0,125
		85,6	0,003	0,018	0,143
		96,3	0,004	0,020	0,161
		107	0,004	0,022	0,178

Quadro A.6 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	Emed (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,461
		7	0,150	0,374	0,184	0,492	
		14	0,301	0,752	0,368	0,490	
		21	0,479	1,198	0,553	0,461	
		28	0,675	1,688	0,737	0,437	
		35	0,902	2,256	0,921	0,408	
		42	1,153	2,882	1,105	0,383	
		49	1,422	3,555	1,289	0,363	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	Emed (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,517
		7	0,079	0,331	0,184	0,557	
		14	0,159	0,665	0,368	0,554	
		21	0,257	1,069	0,553	0,517	
		28	0,367	1,529	0,737	0,482	
		35	0,498	2,075	0,921	0,444	
		42	0,647	2,695	1,105	0,410	
		49	0,810	3,375	1,289	0,382	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	Emed (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,547
		7	0,025	0,315	0,184	0,585	
		14	0,050	0,631	0,368	0,584	
		21	0,081	1,010	0,553	0,547	
		28	0,115	1,439	0,737	0,512	
		35	0,155	1,942	0,921	0,474	
		42	0,203	2,533	1,105	0,436	
		49	0,255	3,186	1,289	0,405	

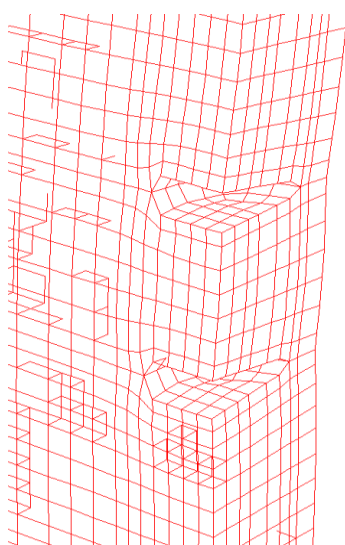
Quadro A.7 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	Emed (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,365
		7	0,197	0,492	0,184	0,374	
		14	0,394	0,985	0,368	0,374	
		21	0,605	1,514	0,553	0,365	
		28	0,827	2,069	0,737	0,356	
		35	1,073	2,682	0,921	0,343	
		42	1,342	3,354	1,105	0,329	
		49	1,631	4,077	1,289	0,316	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	Emed (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,368
		7	0,116	0,485	0,184	0,380	
		14	0,233	0,970	0,368	0,380	
		21	0,360	1,500	0,553	0,368	
		28	0,495	2,064	0,737	0,357	
		35	0,649	2,706	0,921	0,340	
		42	0,822	3,423	1,105	0,323	
		49	1,011	4,214	1,289	0,306	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	Emed (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,373
		7	0,038	0,477	0,184	0,386	
		14	0,076	0,955	0,368	0,386	
		21	0,119	1,481	0,553	0,373	
		28	0,164	2,050	0,737	0,359	
		35	0,217	2,710	0,921	0,340	
		42	0,277	3,459	1,105	0,320	
		49	0,358	4,474	1,289	0,288	

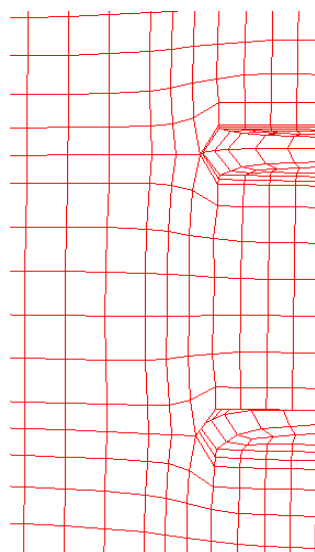
Quadro A.8 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε (‰)	σ (MPa)	ε_{med} (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	0,014	0,054	0,184	0,433	0,124
		14	0,028	0,110	0,368	0,869	0,126
		21	0,047	0,187	0,553	1,356	0,138
		28	0,073	0,291	0,737	1,878	0,155
		35	0,125	0,493	0,921	2,469	0,200
		42	0,205	0,810	1,105	3,118	0,260
		49	0,309	1,223	1,289	3,816	0,320
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε (‰)	σ (MPa)	ε_{med} (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	0,013	0,072	0,184	0,408	0,177
		14	0,026	0,146	0,368	0,817	0,179
		21	0,042	0,239	0,553	1,285	0,186
		28	0,064	0,367	0,737	1,796	0,205
		35	0,120	0,684	0,921	2,390	0,286
		42	0,208	1,186	1,105	3,059	0,388
		49	0,318	1,819	1,289	3,795	0,479

A.4. ANÁLISE DO CASO DAS PLACAS RÍGIDAS



(a) Vista em Perspectiva



(b) Vista de Alçado Frontal

Fig.A.8 – Pormenor da deformada da parede entre os rasgos para a acção PP+FT+FM

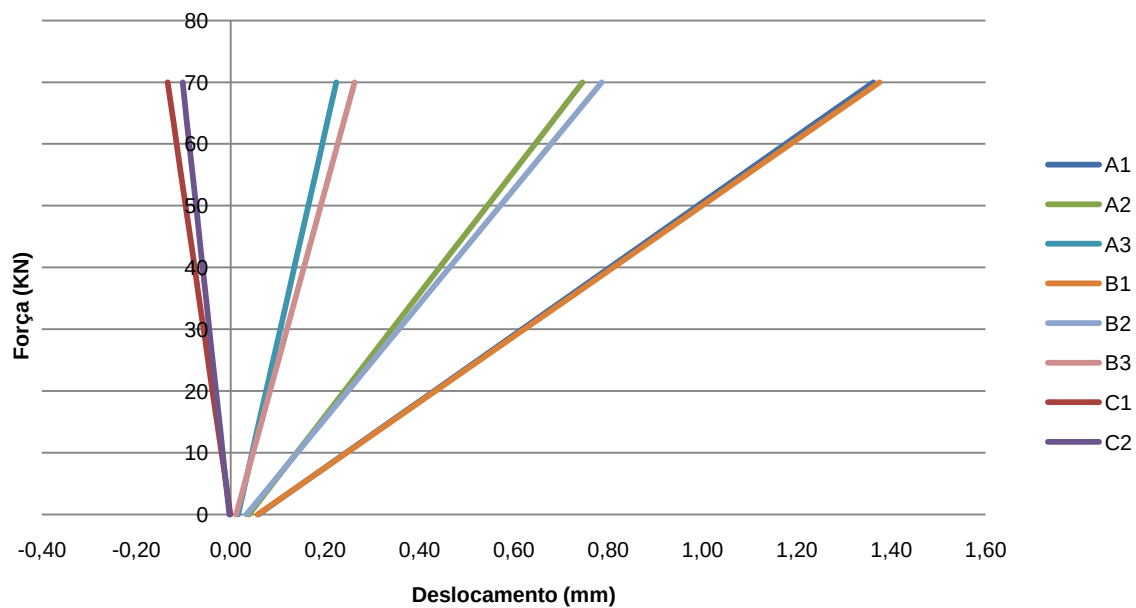


Fig.A.9 – Deslocamentos lineares para a acção FM

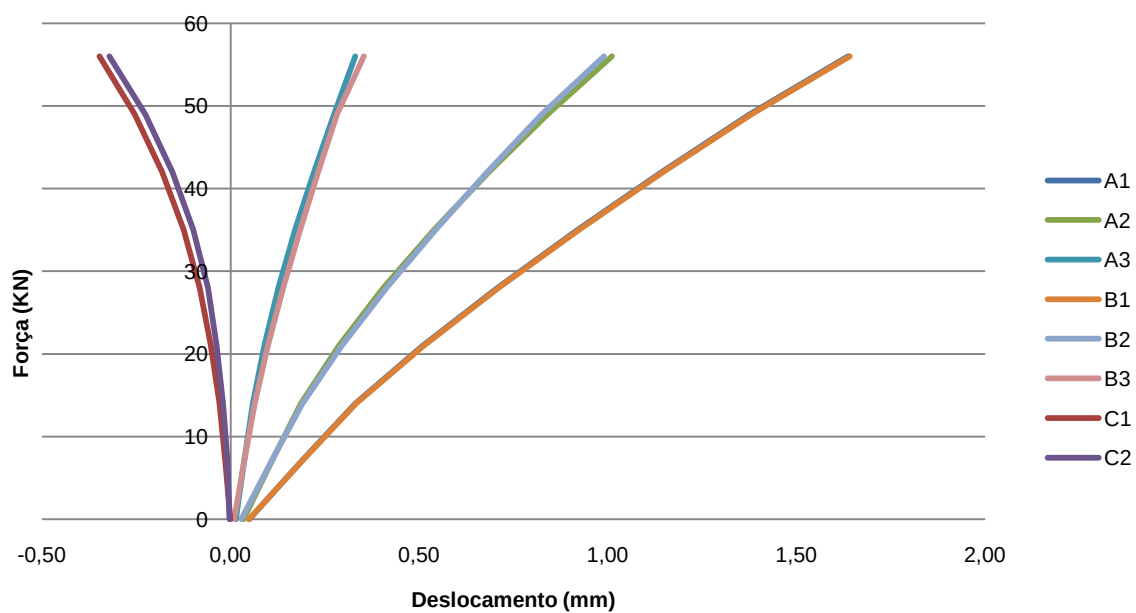


Fig.A.10 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM

Quadro A.9 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,481
		7	0,139	0,346	0,184	0,532	
		14	0,281	0,701	0,368	0,525	
		21	0,460	1,150	0,553	0,481	
		28	0,658	1,646	0,737	0,448	
		35	0,871	2,177	0,921	0,423	
		42	1,093	2,733	1,105	0,404	
		49	1,327	3,318	1,289	0,389	
		56	1,588	3,969	1,474	0,371	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,524
		7	0,075	0,313	0,184	0,589	
		14	0,152	0,634	0,368	0,581	
		21	0,253	1,054	0,553	0,524	
		28	0,371	1,547	0,737	0,476	
		35	0,505	2,104	0,921	0,438	
		42	0,650	2,709	1,105	0,408	
		49	0,806	3,360	1,289	0,384	
		56	0,977	4,070	1,474	0,362	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,588
		7	0,022	0,277	0,184	0,665	
		14	0,045	0,560	0,368	0,658	
		21	0,075	0,940	0,553	0,588	
		28	0,113	1,406	0,737	0,524	
		35	0,157	1,962	0,921	0,469	
		42	0,207	2,584	1,105	0,428	
		49	0,260	3,249	1,289	0,397	
		56	0,316	3,953	1,474	0,373	

Quadro A.10 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,478
		7	0,140	0,349	0,184	0,527	
		14	0,283	0,708	0,368	0,521	
		21	0,463	1,157	0,553	0,478	
		28	0,662	1,655	0,737	0,445	
		35	0,875	2,187	0,921	0,421	
		42	1,097	2,744	1,105	0,403	
		49	1,332	3,330	1,289	0,387	
		56	1,593	3,982	1,474	0,370	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,498
		7	0,080	0,333	0,184	0,554	
		14	0,162	0,674	0,368	0,547	
		21	0,266	1,109	0,553	0,498	
		28	0,385	1,605	0,737	0,459	
		35	0,515	2,145	0,921	0,429	
		42	0,652	2,716	1,105	0,407	
		49	0,797	3,320	1,289	0,388	
		56	0,961	4,005	1,474	0,368	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,496
		7	0,027	0,333	0,184	0,554	
		14	0,054	0,674	0,368	0,546	
		21	0,089	1,114	0,553	0,496	
		28	0,130	1,621	0,737	0,455	
		35	0,174	2,179	0,921	0,423	
		42	0,222	2,774	1,105	0,398	
		49	0,273	3,406	1,289	0,379	
		56	0,343	4,293	1,474	0,343	

Quadro A.11 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,013	-0,052	0,184	0,348	0,149
		14	-0,029	-0,113	0,368	0,705	0,161
		21	-0,052	-0,205	0,553	1,153	0,178
		28	-0,081	-0,322	0,737	1,650	0,195
		35	-0,124	-0,491	0,921	2,182	0,225
		42	-0,181	-0,716	1,105	2,738	0,261
		49	-0,253	-1,003	1,289	3,324	0,302
		56	-0,347	-1,372	1,474	3,976	0,345
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,005	-0,029	0,184	0,323	0,089
		14	-0,017	-0,097	0,368	0,654	0,148
		21	-0,034	-0,196	0,553	1,082	0,181
		28	-0,057	-0,324	0,737	1,576	0,206
		35	-0,096	-0,548	0,921	2,124	0,258
		42	-0,151	-0,863	1,105	2,713	0,318
		49	-0,223	-1,275	1,289	3,340	0,382
		56	-0,318	-1,819	1,474	4,038	0,451

A.5. ANÁLISE DO CASO FT=140KN

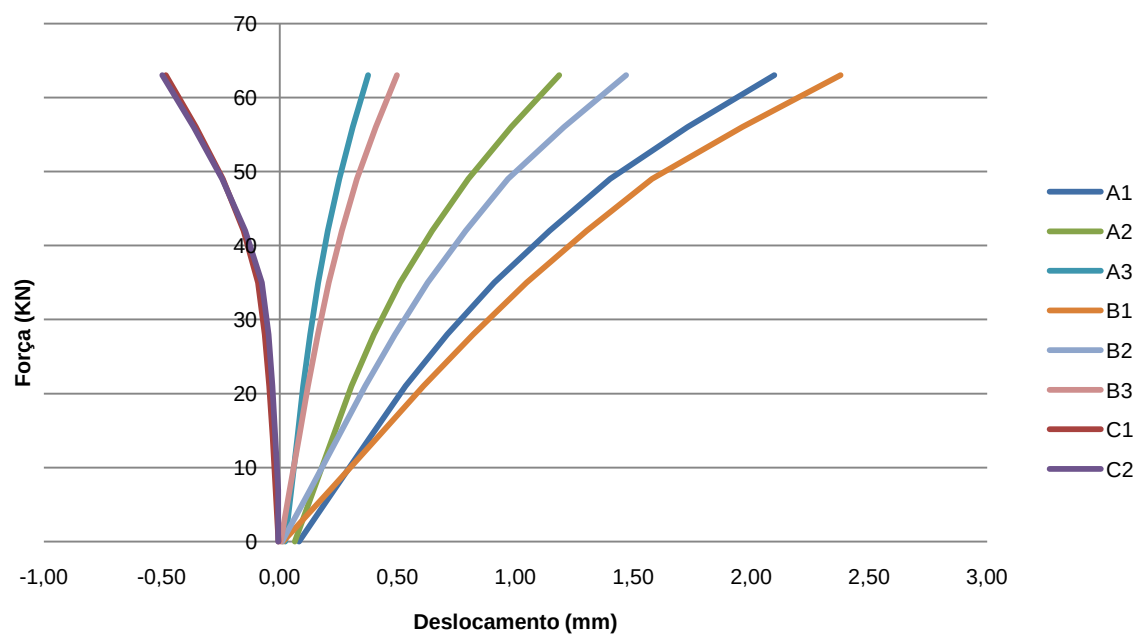


Fig.A.11 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (Caso FT=140kN)

Quadro A.12 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso FT=140KN)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,489
		7	0,149	0,374	0,184	0,493	
		14	0,300	0,749	0,368	0,492	
		21	0,452	1,131	0,553	0,489	
		28	0,628	1,571	0,737	0,469	
		35	0,828	2,071	0,921	0,445	
		42	1,063	2,658	1,105	0,416	
		49	1,320	3,299	1,289	0,391	
		56	1,649	4,122	1,474	0,358	
		63	2,017	5,042	1,658	0,329	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,549
		7	0,081	0,336	0,184	0,547	
		14	0,161	0,670	0,368	0,550	
		21	0,241	1,006	0,553	0,549	
		28	0,336	1,399	0,737	0,527	
		35	0,447	1,863	0,921	0,494	
		42	0,583	2,429	1,105	0,455	
		49	0,736	3,067	1,289	0,420	
		56	0,919	3,828	1,474	0,385	
		63	1,122	4,675	1,658	0,355	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,578
		7	0,026	0,321	0,184	0,574	
		14	0,051	0,638	0,368	0,578	
		21	0,076	0,955	0,553	0,578	
		28	0,106	1,320	0,737	0,558	
		35	0,139	1,741	0,921	0,529	
		42	0,180	2,254	1,105	0,490	
		49	0,229	2,864	1,289	0,450	
		56	0,286	3,579	1,474	0,412	
		63	0,352	4,396	1,658	0,377	

Quadro A.13 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso FT=140KN)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,370
		7	0,201	0,503	0,184	0,366	
		14	0,399	0,998	0,368	0,369	
		21	0,597	1,493	0,553	0,370	
		28	0,807	2,018	0,737	0,365	
		35	1,033	2,582	0,921	0,357	
		42	1,288	3,221	1,105	0,343	
		49	1,566	3,915	1,289	0,329	
		56	1,949	4,872	1,474	0,302	
		63	2,365	5,913	1,658	0,280	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,375
		7	0,119	0,497	0,184	0,371	
		14	0,236	0,985	0,368	0,374	
		21	0,353	1,472	0,553	0,375	
		28	0,480	1,998	0,737	0,369	
		35	0,618	2,574	0,921	0,358	
		42	0,780	3,248	1,105	0,340	
		49	0,959	3,995	1,289	0,323	
		56	1,197	4,986	1,474	0,296	
		63	1,459	6,079	1,658	0,273	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,382
		7	0,039	0,489	0,184	0,377	
		14	0,078	0,969	0,368	0,380	
		21	0,116	1,448	0,553	0,382	
		28	0,158	1,972	0,737	0,374	
		35	0,204	2,554	0,921	0,361	
		42	0,260	3,254	1,105	0,340	
		49	0,323	4,037	1,289	0,319	
		56	0,404	5,050	1,474	0,292	
		63	0,494	6,171	1,658	0,269	

Quadro A.14 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM (Caso FT=140kN)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	v
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,012	-0,049	0,184	0,439	0,113
		14	-0,026	-0,101	0,368	0,874	0,116
		21	-0,040	-0,158	0,553	1,312	0,120
		28	-0,059	-0,232	0,737	1,795	0,129
		35	-0,088	-0,347	0,921	2,326	0,149
		42	-0,149	-0,589	1,105	2,939	0,200
		49	-0,237	-0,940	1,289	3,607	0,261
		56	-0,351	-1,389	1,474	4,497	0,309
		63	-0,479	-1,895	1,658	5,478	0,346
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	v
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	0,000	0,000	0,184	0,417	0,000
		14	-0,012	-0,071	0,368	0,827	0,086
		21	-0,026	-0,146	0,553	1,239	0,118
		28	-0,042	-0,239	0,737	1,699	0,140
		35	-0,070	-0,402	0,921	2,219	0,181
		42	-0,140	-0,800	1,105	2,839	0,282
		49	-0,238	-1,360	1,289	3,531	0,385
		56	-0,358	-2,047	1,474	4,407	0,465
		63	-0,492	-2,810	1,658	5,377	0,523

A.6. ANÁLISE DO CASO 2

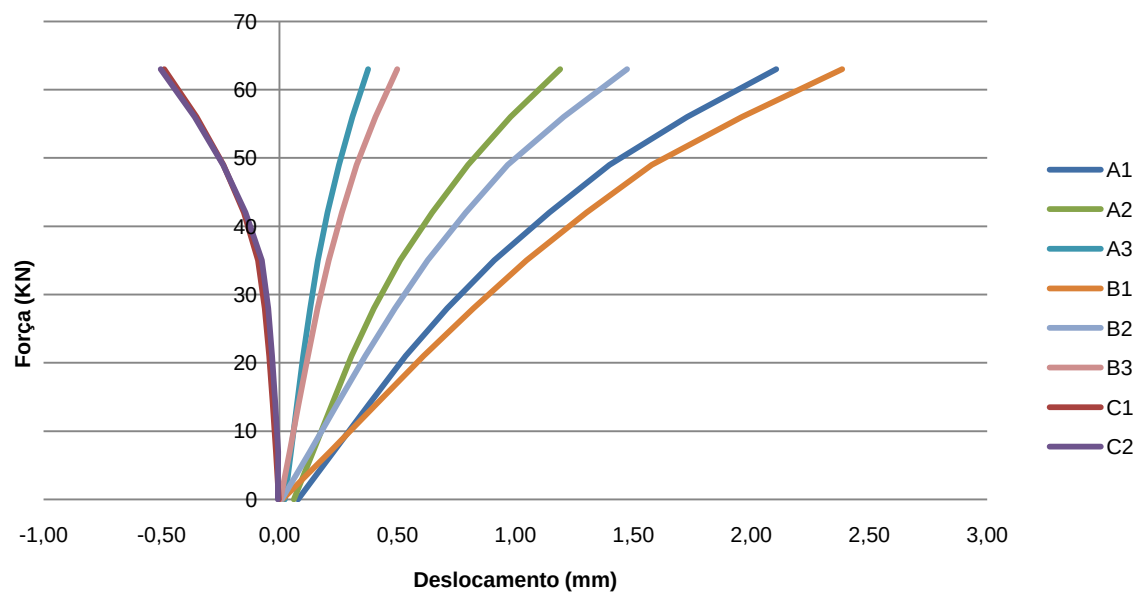


Fig.A.12 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (Caso 2)

Quadro A.15 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 2)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,484
		7	0,151	0,377	0,184	0,488	
		14	0,302	0,756	0,368	0,487	
		21	0,456	1,141	0,553	0,484	
		28	0,633	1,583	0,737	0,466	
		35	0,833	2,082	0,921	0,442	
		42	1,066	2,666	1,105	0,415	
		49	1,321	3,303	1,289	0,390	
		56	1,650	4,125	1,474	0,357	
		63	2,027	5,069	1,658	0,327	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,543
		7	0,082	0,341	0,184	0,541	
		14	0,163	0,678	0,368	0,543	
		21	0,244	1,018	0,553	0,543	
		28	0,339	1,414	0,737	0,521	
		35	0,451	1,877	0,921	0,491	
		42	0,586	2,440	1,105	0,453	
		49	0,737	3,072	1,289	0,420	
		56	0,919	3,829	1,474	0,385	
		63	1,128	4,701	1,658	0,353	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,570
		7	0,026	0,325	0,184	0,566	
		14	0,052	0,647	0,368	0,570	
		21	0,078	0,969	0,553	0,570	
		28	0,107	1,337	0,737	0,551	
		35	0,141	1,759	0,921	0,524	
		42	0,181	2,268	1,105	0,487	
		49	0,230	2,869	1,289	0,449	
		56	0,286	3,577	1,474	0,412	
		63	0,354	4,420	1,658	0,375	

Quadro A.16 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 2)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,369
		7	0,202	0,504	0,184	0,365	
		14	0,400	1,001	0,368	0,368	
		21	0,599	1,497	0,553	0,369	
		28	0,810	2,024	0,737	0,364	
		35	1,035	2,587	0,921	0,356	
		42	1,289	3,223	1,105	0,343	
		49	1,566	3,914	1,289	0,329	
		56	1,948	4,871	1,474	0,303	
		63	2,373	5,934	1,658	0,279	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,374
		7	0,120	0,498	0,184	0,370	
		14	0,237	0,989	0,368	0,373	
		21	0,355	1,478	0,553	0,374	
		28	0,481	2,006	0,737	0,367	
		35	0,619	2,581	0,921	0,357	
		42	0,780	3,252	1,105	0,340	
		49	0,959	3,994	1,289	0,323	
		56	1,196	4,985	1,474	0,296	
		63	1,465	6,106	1,658	0,272	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,380
		7	0,039	0,491	0,184	0,375	
		14	0,078	0,974	0,368	0,378	
		21	0,116	1,456	0,553	0,380	
		28	0,158	1,981	0,737	0,372	
		35	0,205	2,562	0,921	0,359	
		42	0,261	3,258	1,105	0,339	
		49	0,323	4,036	1,289	0,320	
		56	0,404	5,048	1,474	0,292	
		63	0,496	6,199	1,658	0,267	

Quadro A.17 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM (Caso 2)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,013	-0,052	0,184	0,441	0,118
		14	-0,027	-0,106	0,368	0,879	0,121
		21	-0,042	-0,165	0,553	1,319	0,125
		28	-0,061	-0,240	0,737	1,804	0,133
		35	-0,089	-0,354	0,921	2,334	0,152
		42	-0,149	-0,591	1,105	2,944	0,201
		49	-0,236	-0,933	1,289	3,609	0,258
		56	-0,349	-1,383	1,474	4,498	0,308
		63	-0,487	-1,928	1,658	5,501	0,350
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,002	0,011	0,184	0,420	0,026
		14	-0,011	-0,062	0,368	0,833	0,074
		21	-0,024	-0,138	0,553	1,248	0,110
		28	-0,040	-0,231	0,737	1,710	0,135
		35	-0,068	-0,390	0,921	2,229	0,175
		42	-0,137	-0,781	1,105	2,846	0,274
		49	-0,232	-1,327	1,289	3,533	0,376
		56	-0,353	-2,018	1,474	4,407	0,458
		63	-0,496	-2,835	1,658	5,403	0,525

A.7. ANÁLISE DO CASO 3

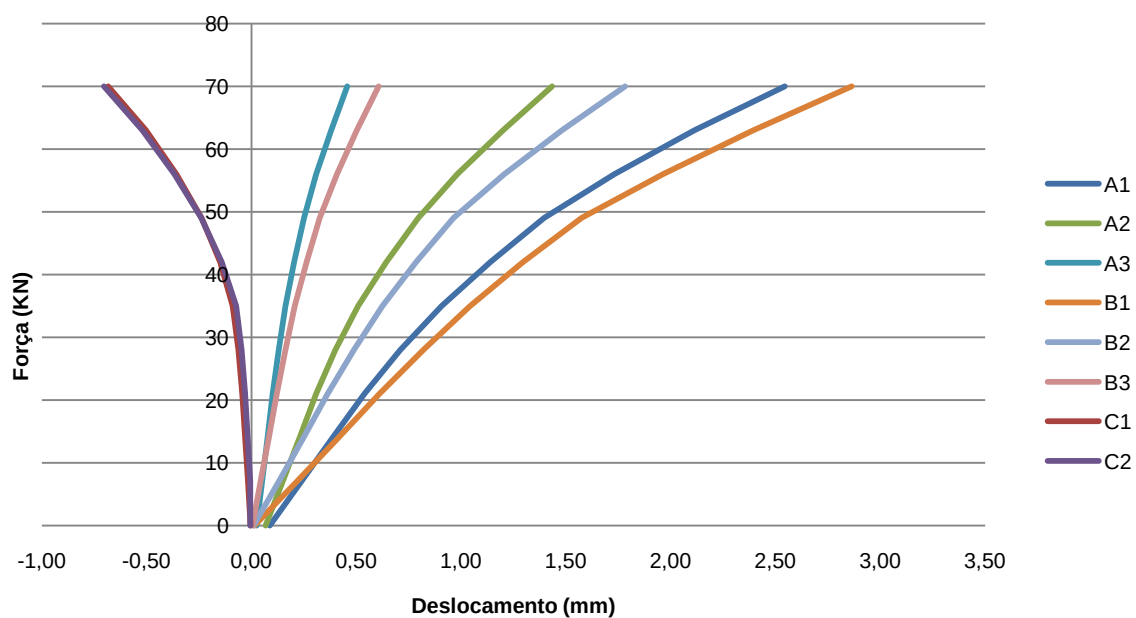


Fig.A.13 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (Caso 3)

Quadro A.18 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 3)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,489
		7	0,150	0,374	0,184	0,492	
		14	0,300	0,751	0,368	0,491	
		21	0,452	1,130	0,553	0,489	
		28	0,624	1,560	0,737	0,472	
		35	0,820	2,051	0,921	0,449	
		42	1,052	2,631	1,105	0,420	
		49	1,310	3,275	1,289	0,394	
		56	1,645	4,112	1,474	0,358	
		63	2,028	5,069	1,658	0,327	
		70	2,458	6,144	1,842	0,300	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,548
		7	0,081	0,339	0,184	0,544	
		14	0,162	0,674	0,368	0,547	
		21	0,242	1,008	0,553	0,548	
		28	0,334	1,390	0,737	0,530	
		35	0,442	1,841	0,921	0,500	
		42	0,576	2,399	1,105	0,461	
		49	0,729	3,037	1,289	0,425	
		56	0,915	3,814	1,474	0,386	
		63	1,133	4,720	1,658	0,351	
		70	1,367	5,698	1,842	0,323	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,577
		7	0,026	0,323	0,184	0,571	
		14	0,051	0,642	0,368	0,574	
		21	0,077	0,959	0,553	0,577	
		28	0,105	1,313	0,737	0,561	
		35	0,138	1,722	0,921	0,535	
		42	0,178	2,223	1,105	0,497	
		49	0,226	2,828	1,289	0,456	
		56	0,284	3,556	1,474	0,414	
		63	0,355	4,438	1,658	0,374	
		70	0,433	5,406	1,842	0,341	

Quadro A.19 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 3)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,370
		7	0,202	0,505	0,184	0,364	
		14	0,401	1,002	0,368	0,368	
		21	0,598	1,495	0,553	0,370	
		28	0,806	2,015	0,737	0,366	
		35	1,029	2,573	0,921	0,358	
		42	1,282	3,206	1,105	0,345	
		49	1,561	3,902	1,289	0,330	
		56	1,951	4,876	1,474	0,302	
		63	2,382	5,955	1,658	0,278	
		70	2,851	7,128	1,842	0,258	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,375
		7	0,120	0,499	0,184	0,369	
		14	0,237	0,989	0,368	0,372	
		21	0,354	1,475	0,553	0,375	
		28	0,479	1,994	0,737	0,370	
		35	0,615	2,561	0,921	0,360	
		42	0,775	3,229	1,105	0,342	
		49	0,955	3,978	1,289	0,324	
		56	1,198	4,991	1,474	0,295	
		63	1,472	6,134	1,658	0,270	
		70	1,773	7,387	1,842	0,249	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,381
		7	0,039	0,491	0,184	0,375	
		14	0,078	0,974	0,368	0,378	
		21	0,116	1,451	0,553	0,381	
		28	0,157	1,966	0,737	0,375	
		35	0,203	2,539	0,921	0,363	
		42	0,258	3,230	1,105	0,342	
		49	0,321	4,017	1,289	0,321	
		56	0,404	5,056	1,474	0,291	
		63	0,499	6,240	1,658	0,266	
		70	0,603	7,534	1,842	0,245	

Quadro A.20 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM (Caso 3)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,013	-0,050	0,184	0,440	0,114
		14	-0,026	-0,102	0,368	0,876	0,117
		21	-0,040	-0,159	0,553	1,312	0,121
		28	-0,058	-0,231	0,737	1,788	0,129
		35	-0,086	-0,339	0,921	2,312	0,147
		42	-0,145	-0,573	1,105	2,918	0,196
		49	-0,234	-0,926	1,289	3,589	0,258
		56	-0,354	-1,400	1,474	4,494	0,312
		63	-0,499	-1,978	1,658	5,512	0,359
		70	-0,679	-2,689	1,842	6,636	0,405
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,001	0,006	0,184	0,419	0,014
		14	-0,011	-0,066	0,368	0,832	0,079
		21	-0,025	-0,140	0,553	1,241	0,113
		28	-0,040	-0,230	0,737	1,692	0,136
		35	-0,066	-0,380	0,921	2,201	0,173
		42	-0,135	-0,770	1,105	2,814	0,274
		49	-0,234	-1,336	1,289	3,508	0,381
		56	-0,362	-2,066	1,474	4,402	0,469
		63	-0,513	-2,934	1,658	5,427	0,541
		70	-0,697	-3,983	1,842	6,542	0,609

A.8. ANÁLISE DO CASO 4

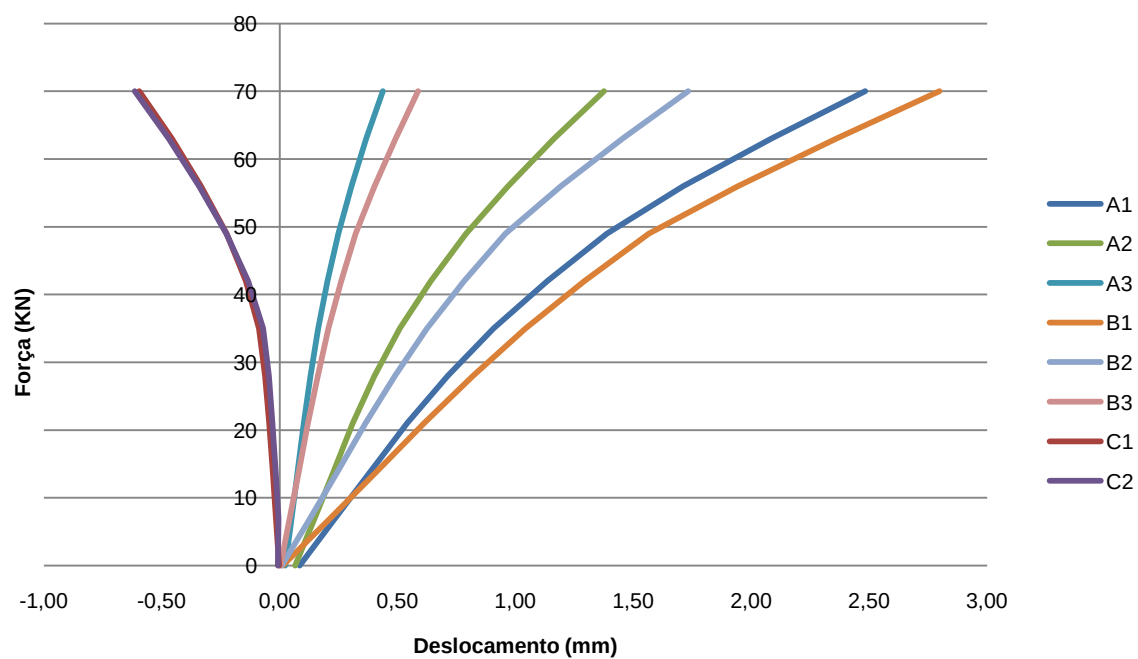


Fig.A.14 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (Caso 4)

Quadro A.21 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 4)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,484
		7	0,151	0,378	0,184	0,487	
		14	0,303	0,759	0,368	0,486	
		21	0,456	1,141	0,553	0,484	
		28	0,629	1,572	0,737	0,469	
		35	0,823	2,058	0,921	0,447	
		42	1,052	2,629	1,105	0,420	
		49	1,304	3,259	1,289	0,396	
		56	1,627	4,067	1,474	0,362	
		63	2,002	5,006	1,658	0,331	
		70	2,400	6,000	1,842	0,307	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,541
		7	0,082	0,343	0,184	0,537	
		14	0,164	0,684	0,368	0,539	
		21	0,245	1,022	0,553	0,541	
		28	0,337	1,406	0,737	0,524	
		35	0,444	1,852	0,921	0,497	
		42	0,576	2,399	1,105	0,461	
		49	0,725	3,019	1,289	0,427	
		56	0,904	3,765	1,474	0,391	
		63	1,098	4,576	1,658	0,362	
		70	1,311	5,462	1,842	0,337	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,567
		7	0,026	0,328	0,184	0,562	
		14	0,052	0,653	0,368	0,564	
		21	0,078	0,974	0,553	0,567	
		28	0,107	1,332	0,737	0,553	
		35	0,139	1,738	0,921	0,530	
		42	0,178	2,230	1,105	0,496	
		49	0,225	2,810	1,289	0,459	
		56	0,280	3,505	1,474	0,420	
		63	0,343	4,294	1,658	0,386	
		70	0,413	5,161	1,842	0,357	

Quadro A.22 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 4)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,368
		7	0,203	0,507	0,184	0,364	
		14	0,402	1,005	0,368	0,367	
		21	0,600	1,500	0,553	0,368	
		28	0,808	2,021	0,737	0,365	
		35	1,030	2,575	0,921	0,358	
		42	1,280	3,200	1,105	0,345	
		49	1,554	3,884	1,289	0,332	
		56	1,931	4,827	1,474	0,305	
		63	2,348	5,871	1,658	0,282	
		70	2,786	6,966	1,842	0,264	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,373
		7	0,120	0,501	0,184	0,368	
		14	0,238	0,993	0,368	0,371	
		21	0,355	1,481	0,553	0,373	
		28	0,480	2,001	0,737	0,368	
		35	0,616	2,565	0,921	0,359	
		42	0,773	3,221	1,105	0,343	
		49	0,949	3,955	1,289	0,326	
		56	1,183	4,930	1,474	0,299	
		63	1,446	6,024	1,658	0,275	
		70	1,724	7,183	1,842	0,256	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,379
		7	0,039	0,493	0,184	0,373	
		14	0,078	0,979	0,368	0,376	
		21	0,117	1,459	0,553	0,379	
		28	0,158	1,975	0,737	0,373	
		35	0,203	2,543	0,921	0,362	
		42	0,258	3,221	1,105	0,343	
		49	0,319	3,989	1,289	0,323	
		56	0,399	4,982	1,474	0,296	
		63	0,488	6,101	1,658	0,272	
		70	0,584	7,296	1,842	0,252	

Quadro A.23 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM (Caso 4)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,013	-0,052	0,184	0,443	0,118
		14	-0,027	-0,106	0,368	0,882	0,120
		21	-0,041	-0,164	0,553	1,320	0,124
		28	-0,060	-0,236	0,737	1,796	0,131
		35	-0,086	-0,339	0,921	2,317	0,146
		42	-0,141	-0,557	1,105	2,915	0,191
		49	-0,223	-0,882	1,289	3,572	0,247
		56	-0,330	-1,308	1,474	4,447	0,294
		63	-0,454	-1,799	1,658	5,438	0,331
		70	-0,593	-2,350	1,842	6,483	0,363
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,003	0,015	0,184	0,422	0,036
		14	-0,010	-0,057	0,368	0,838	0,068
		21	-0,023	-0,132	0,553	1,252	0,106
		28	-0,039	-0,222	0,737	1,703	0,130
		35	-0,063	-0,360	0,921	2,208	0,163
		42	-0,126	-0,722	1,105	2,810	0,257
		49	-0,218	-1,248	1,289	3,487	0,358
		56	-0,334	-1,910	1,474	4,348	0,439
		63	-0,464	-2,650	1,658	5,300	0,500
		70	-0,607	-3,467	1,842	6,323	0,548

A.9. ANÁLISE DO CASO 5

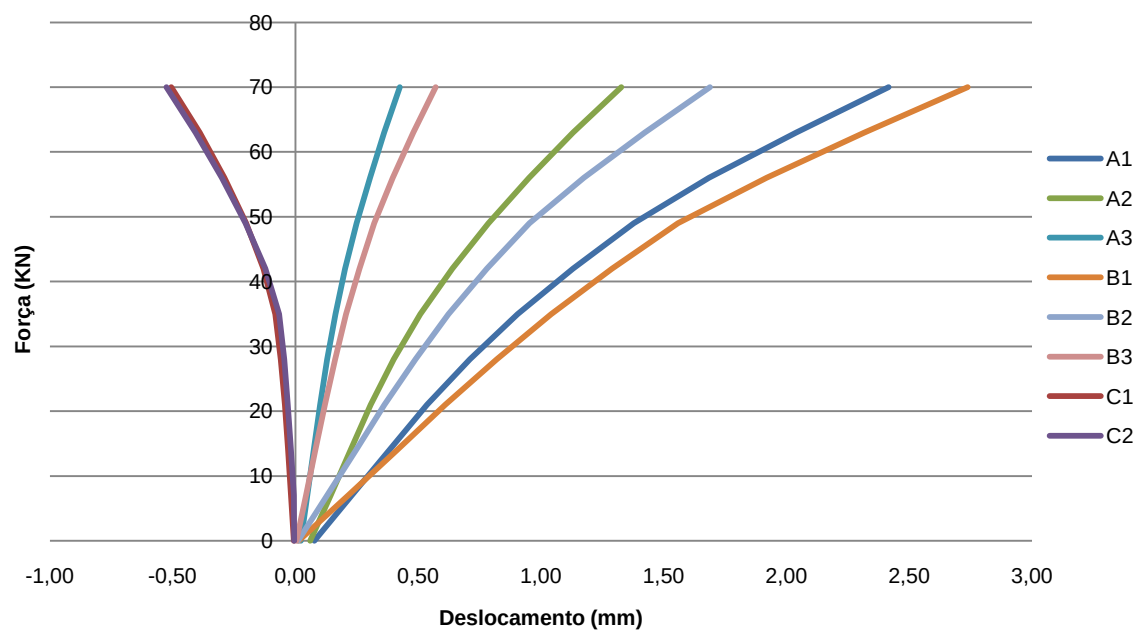


Fig.A.15 – Deslocamentos não-lineares para a ação FM (Caso 5)

Quadro A.24 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A - Caso 5)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,482
		7	0,152	0,380	0,184	0,485	
		14	0,304	0,761	0,368	0,484	
		21	0,458	1,146	0,553	0,482	
		28	0,633	1,583	0,737	0,466	
		35	0,827	2,068	0,921	0,445	
		42	1,053	2,633	1,105	0,420	
		49	1,301	3,252	1,289	0,397	
		56	1,607	4,018	1,474	0,367	
		63	1,961	4,903	1,658	0,338	
		70	2,338	5,846	1,842	0,315	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,539
		7	0,082	0,344	0,184	0,536	
		14	0,164	0,684	0,368	0,538	
		21	0,246	1,025	0,553	0,539	
		28	0,340	1,418	0,737	0,520	
		35	0,448	1,866	0,921	0,494	
		42	0,579	2,411	1,105	0,458	
		49	0,725	3,022	1,289	0,427	
		56	0,891	3,711	1,474	0,397	
		63	1,070	4,458	1,658	0,372	
		70	1,267	5,279	1,842	0,349	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,566
		7	0,026	0,328	0,184	0,562	
		14	0,052	0,652	0,368	0,565	
		21	0,078	0,976	0,553	0,566	
		28	0,107	1,342	0,737	0,549	
		35	0,140	1,754	0,921	0,525	
		42	0,180	2,253	1,105	0,491	
		49	0,227	2,831	1,289	0,455	
		56	0,281	3,517	1,474	0,419	
		63	0,339	4,239	1,658	0,391	
		70	0,402	5,030	1,842	0,366	

Quadro A.25 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B - Caso 5)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,370
		7	0,201	0,503	0,184	0,366	
		14	0,399	0,998	0,368	0,369	
		21	0,597	1,492	0,553	0,370	
		28	0,807	2,016	0,737	0,365	
		35	1,028	2,569	0,921	0,358	
		42	1,276	3,190	1,105	0,346	
		49	1,545	3,862	1,289	0,334	
		56	1,905	4,763	1,474	0,309	
		63	2,303	5,758	1,658	0,288	
		70	2,724	6,809	1,842	0,271	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,376
		7	0,119	0,496	0,184	0,371	
		14	0,236	0,984	0,368	0,374	
		21	0,353	1,470	0,553	0,376	
		28	0,479	1,994	0,737	0,370	
		35	0,613	2,556	0,921	0,360	
		42	0,770	3,208	1,105	0,345	
		49	0,943	3,928	1,289	0,328	
		56	1,164	4,851	1,474	0,304	
		63	1,413	5,886	1,658	0,282	
		70	1,679	6,994	1,842	0,263	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E _{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,382
		7	0,039	0,488	0,184	0,378	
		14	0,077	0,968	0,368	0,381	
		21	0,116	1,446	0,553	0,382	
		28	0,157	1,966	0,737	0,375	
		35	0,202	2,531	0,921	0,364	
		42	0,256	3,206	1,105	0,345	
		49	0,317	3,959	1,289	0,326	
		56	0,392	4,897	1,474	0,301	
		63	0,476	5,952	1,658	0,279	
		70	0,567	7,088	1,842	0,260	

Quadro A.26 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM (Caso 5)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,012	-0,047	0,184	0,441	0,107
		14	-0,024	-0,096	0,368	0,880	0,109
		21	-0,037	-0,148	0,553	1,319	0,112
		28	-0,054	-0,214	0,737	1,800	0,119
		35	-0,077	-0,304	0,921	2,319	0,131
		42	-0,124	-0,492	1,105	2,912	0,169
		49	-0,195	-0,774	1,289	3,557	0,218
		56	-0,284	-1,124	1,474	4,390	0,256
		63	-0,384	-1,522	1,658	5,331	0,286
		70	-0,500	-1,979	1,842	6,328	0,313
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,002	-0,011	0,184	0,420	0,026
		14	-0,014	-0,079	0,368	0,834	0,095
		21	-0,026	-0,149	0,553	1,248	0,119
		28	-0,041	-0,234	0,737	1,706	0,137
		35	-0,062	-0,355	0,921	2,211	0,161
		42	-0,118	-0,672	1,105	2,810	0,239
		49	-0,198	-1,132	1,289	3,475	0,326
		56	-0,295	-1,684	1,474	4,281	0,393
		63	-0,401	-2,293	1,658	5,172	0,443
		70	-0,521	-2,977	1,842	6,136	0,485

A.10. ANÁLISE DO CASO 6

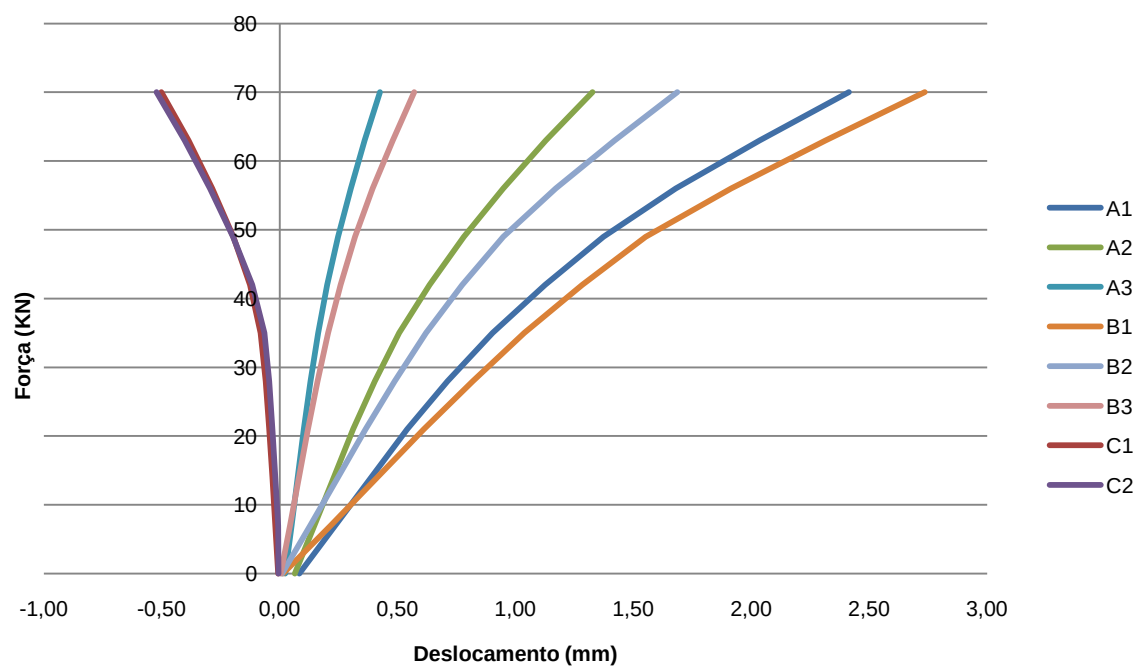


Fig.A.16 – Deslocamentos não-lineares para a acção FM (Caso 6)

Quadro A.27 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base A – Caso 6)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,483
		7	0,152	0,380	0,184	0,485	
		14	0,305	0,762	0,368	0,484	
		21	0,458	1,145	0,553	0,483	
		28	0,629	1,573	0,737	0,469	
		35	0,819	2,049	0,921	0,450	
		42	1,042	2,605	1,105	0,424	
		49	1,289	3,223	1,289	0,400	
		56	1,597	3,993	1,474	0,369	
		63	1,953	4,882	1,658	0,340	
		70	2,331	5,828	1,842	0,316	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,538
		7	0,083	0,345	0,184	0,534	
		14	0,165	0,688	0,368	0,536	
		21	0,247	1,027	0,553	0,538	
		28	0,338	1,410	0,737	0,523	
		35	0,443	1,844	0,921	0,499	
		42	0,571	2,379	1,105	0,465	
		49	0,717	2,987	1,289	0,432	
		56	0,883	3,681	1,474	0,400	
		63	1,064	4,434	1,658	0,374	
		70	1,263	5,261	1,842	0,350	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
A3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,565
		7	0,026	0,329	0,184	0,559	
		14	0,052	0,656	0,368	0,562	
		21	0,078	0,979	0,553	0,565	
		28	0,107	1,335	0,737	0,552	
		35	0,139	1,736	0,921	0,531	
		42	0,178	2,222	1,105	0,498	
		49	0,223	2,790	1,289	0,462	
		56	0,278	3,481	1,474	0,423	
		63	0,337	4,211	1,658	0,394	
		70	0,401	5,017	1,842	0,367	

Quadro A.28 – Extensões não-lineares verticais para a acção FM (Base B – Caso 6)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B1	400	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,370
		7	0,202	0,505	0,184	0,365	
		14	0,401	1,002	0,368	0,368	
		21	0,598	1,495	0,553	0,370	
		28	0,805	2,013	0,737	0,366	
		35	1,024	2,561	0,921	0,360	
		42	1,270	3,174	1,105	0,348	
		49	1,539	3,846	1,289	0,335	
		56	1,901	4,752	1,474	0,310	
		63	2,301	5,752	1,658	0,288	
		70	2,722	6,804	1,842	0,271	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B2	240	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,375
		7	0,119	0,498	0,184	0,370	
		14	0,237	0,988	0,368	0,373	
		21	0,354	1,473	0,553	0,375	
		28	0,477	1,990	0,737	0,370	
		35	0,610	2,544	0,921	0,362	
		42	0,765	3,186	1,105	0,347	
		49	0,938	3,906	1,289	0,330	
		56	1,161	4,836	1,474	0,305	
		63	1,411	5,878	1,658	0,282	
		70	1,677	6,988	1,842	0,264	
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ε_v (‰)	σ (MPa)	E (GPa)	E_{med} (GPa)
B3	80	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,382
		7	0,039	0,490	0,184	0,376	
		14	0,078	0,972	0,368	0,379	
		21	0,116	1,449	0,553	0,382	
		28	0,157	1,960	0,737	0,376	
		35	0,201	2,517	0,921	0,366	
		42	0,254	3,179	1,105	0,348	
		49	0,315	3,934	1,289	0,328	
		56	0,390	4,880	1,474	0,302	
		63	0,475	5,942	1,658	0,279	
		70	0,566	7,079	1,842	0,260	

Quadro A.29 – Extensões não-lineares horizontais para a acção FM (Caso 6)

LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C1	252,5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,012	-0,048	0,184	0,442	0,108
		14	-0,024	-0,097	0,368	0,882	0,110
		21	-0,038	-0,149	0,553	1,320	0,113
		28	-0,054	-0,213	0,737	1,793	0,119
		35	-0,075	-0,298	0,921	2,305	0,129
		42	-0,120	-0,476	1,105	2,890	0,165
		49	-0,191	-0,756	1,289	3,535	0,214
		56	-0,280	-1,107	1,474	4,372	0,253
		63	-0,381	-1,507	1,658	5,317	0,283
		70	-0,495	-1,962	1,842	6,316	0,311
LVDT	L (mm)	F (kN)	d (mm)	ϵ_h (‰)	σ (MPa)	$\epsilon_{v,med}$ (‰)	ν
C2	175	0	0,000	0,000	0,000	0,000	-
		7	-0,001	-0,006	0,184	0,422	0,014
		14	-0,013	-0,074	0,368	0,838	0,089
		21	-0,025	-0,144	0,553	1,250	0,115
		28	-0,040	-0,226	0,737	1,700	0,133
		35	-0,059	-0,340	0,921	2,194	0,155
		42	-0,112	-0,638	1,105	2,783	0,229
		49	-0,193	-1,101	1,289	3,447	0,320
		56	-0,290	-1,657	1,474	4,259	0,389
		63	-0,398	-2,272	1,658	5,156	0,441
		70	-0,517	-2,954	1,842	6,125	0,482

