U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE FACHADAS DE ALVENARIA

FILIPA DANIELA GONÇALVES PEREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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

e ao Flávio

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, quero manifestar os meus agradecimentos a todos aqueles cuja contribuição foi indispensável para a sua realização.

Não poderia, no entanto, deixar de destacar algumas pessoas que tiveram um papel fundamental na sua elaboração:

Ao Professor Hipólito de Sousa, agradeço reconhecidamente, pelo seu aconselhamento, disponibilidade e permanente acompanhamento durante a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Rui Sousa pela orientação na utilização do software *ABAQUS* necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

E por fim à minha família, muito especialmente aos meus pais e ao Flávio, que aturaram os meus desabafos e partilharam das minhas preocupações durante este tempo.

RESUMO

As paredes da envolvente dos edifícios em alvenaria em Portugal, construídas para o preenchimento de estruturas porticadas de betão armado, evoluíram e tem sofrido alterações resultantes da aplicação de novas técnicas construtivas e da crescente exigência de qualidade na construção de edifícios.

Algumas dessas pretensas melhorias de qualidade têm originado novos defeitos nas paredes exteriores em alvenaria, resultantes de um insuficiente conhecimento tecnológico a todos os níveis, desde o projecto à execução.

Atendendo ao número crescente de anomalias que se verificam na construção em Portugal, este trabalho pretende analisar de forma sumária o efeito mecânico nas paredes de alvenaria da existência de um diferencial de temperatura entre o interior e o exterior.

Numa 1ª parte apresenta-se uma síntese das exigências aplicáveis às unidades de alvenaria utilizadas na execução de paredes, conforme as normas actualmente em vigor, e também das paredes da envolvente, tendo por base a regulamentação portuguesa e estrangeira aplicável, para uma melhor caracterização. Discutem-se os métodos experimentais e analíticos de determinação das características térmicas dos produtos e das alvenarias. Faz-se a síntese das exigências dos revestimentos utilizados com maior frequência em Portugal. E, por último, especificam-se as principais causas de fissuração e instabilidade das paredes de alvenaria.

Na 2ª parte do trabalho apresenta-se um modelo numérico de simulação de uma parede de alvenaria sujeita a um diferencial de temperatura entre o interior e o exterior, em regime estacionário, através do método dos elementos finitos usando o programa *ABAQUS*. Apresentam-se os resultados de uma análise de sensibilidade visando avaliar a influência da variação de diversas características da parede, como o coeficiente de transmissão térmica, condutibilidade térmica do material e o próprio gradiente de temperatura, no desempenho mecânico da mesma. Por fim, à luz dos resultados obtidos discute-se de uma forma muito genérica qual a influência que um diferencial de temperatura tem sobre o desempenho mecânico de uma parede de alvenaria, ou seja, qual a sua contribuição para os níveis de tensão estabelecidos nas paredes.

PALAVRAS-CHAVE: Alvenarias, paredes, variações de temperatura, simulação numérica térmica, fissuração.

ABSTRACT

The involving walls of the masonary buildings in Portugal, built and framed by concrete structures have suffered subsequent changes due to other construction and technological demands consequence of increasing quality of buildings.

Some of these pretense improvements of the quality have originated new construction defects resulting from insufficient understanding and technological knowledge on various levels, from the design stage to the execution.

Bearing in mind the increasing number of anomalies that exist in the construction in Portugal, this work intends to analyze the mechanical effect in the masonry walls due the existence of a differential of temperature between the inside and the outside.

In the first part of the work, a summary of the applicable requirements to the masonry units used in the execution of walls is presented, as the norms currently in force, and also of the involving walls of the building, having for basis the Portuguese and foreign regulations, for a better characterization. Experimental and analytical methods for the determination of thermal characteristics of the products and masonary are analyzed. A summary of requirements of the surfacing used with most frequency in Portugal is also made. Finally the main causes of cracking and instability of the masonry walls are specified.

In the second part of the work, and using the computer code *ABAQUS*, it is presented a Finite Element simulation of a masonary wall subject to a differential of temperature between the inside and the outside, in a stationary state. The results of a sensitive analysis are shown, in order to estimate the influence of the variation of diverse characteristics of the wall, as the coefficient of heat transfer, thermal conductivity of the material and the gradient of temperature, in its mechanical performance. At last, the results obtained with the numerical simulation are analyzed, to evaluate the influence that a differential of temperature has on the mechanical performance of a masonry wall, in other words, which its contribution to the established levels of tension in the walls.

KEYWORDS: Masonary, walls, temperature variations, numerical thermal variations, cracking.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. OBJECTIVOS 1

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO 1

2. SÍNTESE EXIGENCIAL DOS ELEMENTOS E DAS PAREDES DE ALVENARIA 3

2.1. GENERALIDADES 3

2.2. UNIDADES DE ALVENARIA CERÂMICAS E DE BETÃO 4

2.2.1. EXIGÊNCIAS DIMENSIONAIS 4

2.2.2. PERCENTAGEM DE FURAÇÃO 5

2.2.3. MASSA VOLÚMICA SECA 6

2.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA 6

2.2.5. PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA 7

2.2.6. EXPANSÃO COM A HUMIDADE 7

2.2.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 7

2.2.8. TEOR EM SAIS SOLÚVEIS ACTIVOS 8

2.2.9. PROPRIEDADES TÉRMICAS 9

2.2.10. REACÇÃO AO FOGO 9

2.2.11. ADERÊNCIA 9

2.2.12. RESISTÊNCIA AO GELO/DEGELO 10

2.3. PAREDES DA ENVOLVENTE 11

2.3.1. ESTABILIDADE 11

2.3.2. SEGURANÇA AO FOGO 12

2.3.3. CONFORTO ACÚSTICO 15

2.3.4. CONFORTO TERMOHIGROMÉTRICO 15

2.3.5. ESTANQUIDADE À ÁGUA DA CHUVA 16

2.3.6. DURABILIDADE 20

2.3.7. INSTALAÇÕES EMBEBIDAS 21

3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS E ELEMENTOS DE ALVENARIA ... 23

3.1. GENERALIDADES 23

3.2. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS 24

3.2.1. MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS 24

3.2.2. MÉTODOS NÃO EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS 25

3.2.2.1. Recurso a valores tabelados 25

3.2.2.2. Determinação por métodos analíticos 26

3.3. DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS DOS PRODUTOS DE ALVENARIA 27

3.3.1. ENQUADRAMENTO 27

3.3.2. CONDUÇÃO 27

3.3.3. CONVECÇÃO 28

3.3.4. RADIAÇÃO 32

3.3.5. TRATAMENTO CONJUNTO DOS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR EM ALVÉOLOS 35

4. REVESTIMENTOS DE PARAMENTOS EXTERIORES DE EDIFÍCIOS 37

4.1. GENERALIDADES 37

4.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS DOS REVESTIMENTOS DE PAREDES EXTERIORES 38

4.2.1. CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL 38

4.2.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS 38

4.3. EXIGÊNCIAS DAS ARGAMASSAS DE ALVENARIA E DE REBOCO 39

4.3.1. ENQUADRAMENTO 39

4.3.2. PROPORÇÃO DOS CONSTITUINTES 40

4.3.3. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA DE ALVENARIA FRESCA 40

4.3.3.1. Tempo em aberto 40

4.3.3.2. Teor de cloretos 40

4.3.3.3. Teor de ar 41

4.3.4. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA ENDURECIDA 41

4.3.4.1. Classificação da argamassa endurecida 41

4.3.4.2. Resistência à compressão 41

4.3.4.3. Resistência do conjunto 42
4.3.4.4. Absorção de água 42
4.3.4.5. Permeabilidade ao vapor de água 43
4.3.4.6. Permeabilidade à água após ciclos climatéricos 43
4.3.4.7. Densidade 43
4.3.4.8. Condutibilidade térmica 43
4.3.4.9. Aderência 44
4.3.4.10. Reacção ao fogo 44
4.3.4.11. Durabilidade 44
4.3.5. PROPRIEDADES ADICIONAIS DA ARGAMASSA-COLA DE ALVENARIA PARA JUNTAS DELGADAS 45
4.3.5.1. Dimensão do agregado 45
4.3.5.2. Tempo de correcção 45
4.4. REBOCOS TRADICIONAIS DE LIGANTES HIDRÁULICOS 45
4.4.1. DEFINIÇÃO DOS REBOCOS TRADICIONAIS 45
4.4.2. CAMADAS CONSTITUINTES 46
4.4.2.1. Identificação das camadas 46
4.4.2.2. Crespido 46
4.4.2.3. Camada de base 46
4.4.2.4. Camada de acabamento 46
4.4.3. ANOMALIAS 47
4.5. REBOCOS NÃO TRADICIONAIS DE LIGANTES HIDRÁULICOS 47
4.5.1. DEFINIÇÃO DOS REBOCOS NÃO TRADICIONAIS 47
4.5.2. ANOMALIAS 47
4.6. REVESTIMENTOS DE PEDRA NATURAL 48
4.6.1. DEFINIÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE PEDRA NATURAL 48
4.6.2. PLACAS DE PEDRA 48
4.7. SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO POR REVESTIMENTO DELGADO SOBRE ISOLANTE 49
4.7.1. DEFINIÇÃO DO REVESTIMENTO DELGADO SOBRE ISOLANTE 49
4.7.2. CAMADAS CONSTITUINTES 49
4.8. REVESTIMENTOS POR ELEMENTOS DESCONTÍNUOS COM FUNÇÃO DE ACABAMENTO 50

5. FISSURAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA 51
5.1. GENERALIDADES 51

5.2. A EVOLUÇÃO DA ESTRUTURA E DA ALVENARIA EM PORTUGAL 51
5.3. PRINCÍPIOS GERAIS DE CONSTRUÇÃO 53
5.3.1. MODULAÇÃO DA CONSTRUÇÃO 53
5.3.2. POSIÇÃO RELATIVA DA ESTRUTURA 55
5.3.3. JUNTAS DE DILATAÇÃO 56
5.3.3.1. Importância das juntas de dilatação 56
5.3.3.2. Transmissão de esforços 57
5.3.3.3. Estanquidade à água das juntas na envolvente vertical 57
5.3.3.4. Características térmicas das juntas 59
5.4. CAUSAS DA INSTABILIDADE E FISSURAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA 59
5.5. PRINCIPAIS CAUSAS PARA A INSTABILIDADE E FISSURAÇÃO DE PAREDES 60
5.5.1. VARIAÇÕES DE TEMPERATURA 60
5.5.2. ACÇÃO DA HUMIDADE 62
5.5.3. DEFORMAÇÃO EXCESSIVA DO SUPORTE 64
5.5.4. RETRACÇÃO DA ARGAMASSA 67
5.5.5. EXPANSÃO IRREVERSÍVEL DAS UNIDADES DE ALVENARIA 68
5.5.6. RETRACÇÃO E EXPANSÃO HIGROTÉRMICA DOS MATERIAIS 68
5.5.7. DISTÂNCIA ENTRE JUNTAS DE DILATAÇÃO 69
5.6. CONSEQUÊNCIAS TECNOLÓGICAS 70

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE POR RECURSO A PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS 73
6.1. GENERALIDADES 73
6.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO 73
6.2.1. CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA 73
6.2.2. ENTRADA DE DADOS E SAÍDA DE RESULTADOS 74
6.2.2.1. Entrada de dados 74
6.2.2.2. Saída de resultados 74
6.3. PRESSUPOSTOS DE ANÁLISE 75
6.3.1. ENQUADRAMENTO 75
6.3.2. CONDIÇÕES FRONTEIRA 75
6.3.2.1. Definição dos limites da zona a analisar 75
6.3.2.2. Temperaturas 76

6.3.2.3. Ligações nas condições fronteira....76
6.3.2.4. Resistências térmicas superficiais....77
6.3.3. GEOMETRIA DAS PAREDES DE ALVENARIA....77
6.3.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ADMITIDAS PARA OS MATERIAIS....79
6.3.5. TIPO DE ELEMENTO FINITO E NÍVEL DE DISCRETIZAÇÃO....79
6.4. IDENTIFICAÇÃO DAS ALVENARIAS ANALISADAS....79
6.5. LIMITAÇÕES DA ANÁLISE....81
6.6. CRITÉRIO DE ROTURA....83
6.6.1. DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO DE ROTURA....83
6.6.2. LIMITES DE ROTURA DE UMA PAREDE DE ALVENARIA....84
6.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS....86
6.7.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS....86
6.7.2. COMENTÁRIOS AOS RESULTADOS....87

7. CONCLUSÕES....89
7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS....89
7.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES....90
7.2.1. PAREDE SIMPLES....90
7.2.2. PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR....91
7.2.3. PAREDE DUPLA....91
7.2.4. COMPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES....92
7.3. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO....92

BIBLIOGRAFIA....93

A1. VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE SIMPLES....97
A1.1. GENERALIDADES....97
A1.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE....97
A1.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA1....97
A1.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA2....99
A1.2.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA3....100
A1.2.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA4....102

A1.2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA5 103
A1.2.6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA6 105
A1.2.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA7 106
A1.2.8 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA8 108
A1.2.9. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA9 109

A2. VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR 111

A2.1. GENERALIDADES 111

A2.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 111

A2.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB1 111
A2.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB2 113
A2.2.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB3 114
A2.2.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB4 116
A2.2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB5 117
A2.2.6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB6 119
A2.2.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB7 120
A2.2.8 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB8 122
A2.2.9. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB9 123

A3. VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE DUPLA 125

A3.1. GENERALIDADES 125

A3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 125

A3.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC1 125
A3.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC2 127
A3.2.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC3 128
A3.2.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC4 130
A3.2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC5 131
A3.2.6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC8 133
A3.2.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC9 134

ÍNDICE DE FIGURAS

2. SÍNTESE EXIGENCIAL DOS ELEMENTOS E DAS PAREDES DE ALVENARIA 3

Fig.2.1 – Determinação da expansão com a humidade 7

Fig.2.2 – Criptoflorescências em fachadas de unidades de face à vista 9

Fig.2.3 – Colocação dos provetes na máquina [15] 10

Fig.2.4 – Divisão de Portugal em função das zonas climáticas de Inverno [21] 16

3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS E ELEMENTOS DE ALVENARIA 23

Fig.3.1 – Distribuições de temperaturas e velocidades em escoamento laminar de convecção forçada sobre uma placa plana aquecida à temperatura T_s [31] 29

Fig.3.2 – Distribuições de temperaturas e velocidades na convecção natural sobre uma placa plana aquecida inclinada por um ângulo β em relação à horizontal [31] 29

Fig.3.3 – Perfis de velocidade nas camadas limite laminar, de transição e turbulenta no fluxo sobre uma placa plana [31] 30

Fig.3.4 – Relações geométricas para a determinação do poder emissivo de um elemento de superfície dA_1 [30] 34

5. FISSURAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA 51

Fig.5.1 – Evolução das paredes de alvenaria exteriores em Portugal [50] 52

Fig.5.2 – Exemplos de malhas principais e malhas secundárias [52] 54

Fig.5.3 – Exemplos de disposições construtivas [52] 55

Fig.5.4 – Dimensões de coordenação e de fabrico [52] 55

Fig.5.5 – Posições geométricas da fachada em relação à estrutura [52] 56

Fig.5.6 –Diferentes princípios de organização das juntas para uma eficaz estanquidade à água [53] 59

Fig.5.7 – Movimentos das unidades de alvenaria cerâmica e da estrutura [54] 60

Fig.5.8 – Paredes de alvenaria sem juntas de dilatação [54] 61

Fig.5.9 – Fissuração devido a movimentos de origem térmica [55] 62

Fig.5.10 – Movimentos de origem térmica das coberturas [55] 63

Fig.5.11 – Fissurações típicas de paredes com origem em movimentos devido à variação o teor de humidade [55] 63

Fig.5.12 – Evolução da estrutura de betão armado ao longo dos anos 64

Fig.5.13 – Fendilhação típica em paredes de alvenaria [54] 65
Fig.5.14 – Exemplos de fissuração devido à deformação excessiva do suporte [55] 65
Fig.5.15 – Tipos de anomalias em edifícios com corpos avançados [54] 66
Fig.5.16 – Somatório de flechas duma zona avançada [54] 66
Fig.5.17 – Deformação e transmissão de cargas típicas num edifício [54] 67
Fig.5.18 – Efeitos da expansão irreversível das unidades de alvenaria [54] 69
Fig.5.19 – Separação recomendada para as juntas de dilatação [54] 70
Fig.5.20 – Soluções de isolamento térmico pelo exterior sob placas rígidas de revestimento 71
Fig.5.21 – Soluções de isolamento térmico pelo exterior – sistema ETICS 71

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE POR RECURSO A PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS 73

Fig.6.1 – Alçado da parede de alvenaria a simular 75
Fig.6.2 – Restrições de apoio 76
Fig.6.3 – Soluções correntes de parede: parede simples, parede simples com isolamento pelo exterior e parede dupla 77
Fig.6.4 – Esquema que ilustra a dificuldade de ligação dos dois materiais 80
Fig.6.5 – Curva de resistência intrínseca de um material frágil [51] 83
Fig.6.6 – Componentes da tensão (estado tridimensional) 86

A1. VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE SIMPLES 97

Fig.A1.1 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 97
Fig.A1.2 – Deslocamentos máximos 98
Fig.A1.3 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 98
Fig.A1.4 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 99
Fig.A1.5 – Deslocamentos máximos 99
Fig.A1.6 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 100
Fig.A1.7 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 100
Fig.A1.8 – Deslocamentos máximos 101
Fig.A1.9 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 101
Fig.A1.10 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 102
Fig.A1.11 – Deslocamentos máximos 102
Fig.A1.12 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 103

Fig.A1.13 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 103
Fig.A1.14 – Deslocamentos máximos 104
Fig.A1.15 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 104
Fig.A1.16 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 105
Fig.A1.17 – Deslocamentos máximos 105
Fig.A1.18 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 106
Fig.A1.19 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 106
Fig.A1.20 – Deslocamentos máximos 107
Fig.A1.21 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 107
Fig.A1.22 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 108
Fig.A1.23 – Deslocamentos máximos 108
Fig.A1.24 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 109
Fig.A1.25 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 109
Fig.A1.26 – Deslocamentos máximos 110
Fig.A1.27 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 110

A2. VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR 111

Fig.A2.1 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 111
Fig.A2.2 – Deslocamentos máximos 112
Fig.A2.3 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 112
Fig.A2.4 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 113
Fig.A2.5 – Deslocamentos máximos 113
Fig.A2.6 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 114
Fig.A2.7 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 114
Fig.A2.8 – Deslocamentos máximos 115
Fig.A2.9 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 115
Fig.A2.10 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 116
Fig.A2.11 – Deslocamentos máximos 116
Fig.A2.12 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 117
Fig.A2.13 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 117
Fig.A2.14 – Deslocamentos máximos 118
Fig.A2.15 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 118

Fig.A2.16 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 119
Fig.A2.17 – Deslocamentos máximos 119
Fig.A2.18 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 120
Fig.A2.19 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 120
Fig.A2.20 – Deslocamentos máximos 121
Fig.A2.21 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 121
Fig.A2.22 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 122
Fig.A2.23 – Deslocamentos máximos 122
Fig.A2.24 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 123
Fig.A2.25 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 123
Fig.A2.26 – Deslocamentos máximos 124
Fig.A2.27 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 124

A3. VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE DUPLA 125

Fig.A3.1 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 125
Fig.A3.2 – Deslocamentos máximos 126
Fig.A3.3 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 126
Fig.A3.4 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 127
Fig.A3.5 – Deslocamentos máximos 127
Fig.A3.6 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 128
Fig.A3.7 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 128
Fig.A3.8 – Deslocamentos máximos 129
Fig.A3.9 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 129
Fig.A3.10 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 130
Fig.A3.11 – Deslocamentos máximos 130
Fig.A3.12 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 131
Fig.A3.13 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 131
Fig.A3.14 – Deslocamentos máximos 132
Fig.A3.15 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 132
Fig.A3.16 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior 133
Fig.A3.17 – Deslocamentos máximos 133
Fig.A3.18 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior 134

Fig.A3.19 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior.....134
Fig.A3.20 – Deslocamentos máximos.....135
Fig.A3.21 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior.....135

ÍNDICE DE QUADROS

2. SÍNTESE EXIGENCIAL DOS ELEMENTOS E DAS PAREDES DE ALVENARIA

3

Quadro 2.1 – Tolerâncias dimensionais das unidades de alvenaria cerâmicas, segundo a NP EN 771-1 [1] 4

Quadro 2.2 – Amplitudes dimensionais das unidades de alvenaria cerâmicas, segundo a NP EN 771-1 [1] 4

Quadro 2.3 – Tolerâncias dimensionais das unidades de alvenaria de betão em milímetros, conforme a EN 771-3 [3] 5

Quadro 2.4 – Classificação das unidades em função da percentagem de furação, conforme o EC6: Part 1-1 [6] 5

Quadro 2.5 – Classificação das unidades de alvenaria em função da espessura dos septos, conforme o EC6: Part 1-1 [6] 6

Quadro 2.6 – Tolerâncias admissíveis para a massa volúmica seca, de acordo com a NP EN 771-1 [1] 6

Quadro 2.7 – Categorias das unidades de alvenaria em termos de resistência à compressão, conforme a NP EN 771-1 [1] 8

Quadro 2.8 – Categoria dos teores em sais solúveis activos das unidades de alvenaria cerâmicas, conforme a NP EN 771-1 [1] 8

Quadro 2.9 – Classes de exposição para uma durabilidade adequada contra o gelo/degelo, de acordo com a NP EN 771-1 [1] 11

Quadro 2.10 – Reacção ao fogo de produtos de construção com excepção de revestimentos de piso [17] 12

Quadro 2.11 – Resistência ao fogo padrão de produtos de construção [17] 13

Quadro 2.12 – Condições de protecção de vãos de fachada em confronto [17] 13

Quadro 2.13 – Reacção ao fogo de revestimentos exteriores sobre fachadas [17] 14

Quadro 2.14 – Reacção ao fogo de elementos de revestimento exterior criando caixa-de-ar [17] 14

Quadro 2.15 – Reacção ao fogo dos sistemas compósitos para isolamento térmico exterior com revestimento sobre isolante e o material de isolamento térmico [17] 14

Quadro 2.16 – Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios [17] 15

Quadro 2.17 – Valores máximos do coeficiente de transmissão térmica de paredes segundo o RCCTE [21] 16

Quadro 2.18 – Classificação dos locais em termos de índice de chuva incidente persistente, segundo a BS 5628: Part 3 [22] 17

Quadro 2.19 – Espessura mínima das paredes simples de unidades de alvenaria cerâmicas função da exposição do local à chuva incidente, segundo a BS 5628: Part 3 [22] 18

Quadro 2.20 – Espessura mínima das paredes simples de unidades de alvenaria de betão função da exposição do local à chuva incidente, segundo a BS 5628: Part 3 [22] 18

Quadro 2.21 – Espessuras de tosco de paredes em pano simples de acordo com a DTU 20.1 [23] .. 19

Quadro 2.22 – Especificações mínimas para as unidades de alvenaria em função das classes de exposição, conforme o EC6: Part 2 [24] 20

Quadro 2.23 – Dimensões mínimas de roços horizontais e inclinados, conforme o EC6: Part 2 [24] . 21

Quadro 2.24 – Dimensões mínimas de roços e cavidades verticais, conforme o EC6: Part 2 [24] 22

4. REVESTIMENTOS DE PARAMENTOS EXTERIORES DE EDIFÍCIOS 37

Quadro 4.1 – Classificação das propriedades da argamassa endurecida, conforme a EN 998-1 [35] 41

Quadro 4.2 – Classes da argamassa de alvenaria, segundo a EN 998-2 [36] 42

Quadro 4.3 – Requisitos para as argamassas de reboco, segundo a EN 998-1 [35] 42

Quadro 4.4 – Requisitos para as argamassas de reboco em função da absorção à água, segundo a EN 998-1 [35] 43

Quadro 4.5 – Especificações mínimas para as argamassas em função das classes de exposição, conforme o EC6: Part 2 [24] 45

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE POR RECURSO A PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS 73

Quadro 6.1 – Variáveis nas soluções para se obter diferentes coeficientes de transmissão térmica .. 78

Quadro 6.2 – Valores das características elásticas dos materiais utilizados na análise numérica 79

Quadro 6.3 – Variáveis nas simulações 80

Quadro 6.4 – Lista de simulações realizadas 82

Quadro 6.5 – Síntese de resultados 87

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Q – Fluxo de calor [W]

q – Densidade de fluxo [W/m^2]

λ – Condutibilidade térmica [W/(m.ºC) – W/(m.K)]

h – Condutância térmica superficial [W/(m^2.ºC) – W/(m^2.K)]

R – Resistência térmica [(m^2.ºC)/W – (m^2.K)/W]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m^2.ºC) – W/(m^2.K)]

T – Temperatura [ºC – K]

v – Velocidade [m/s]

l – Dimensão característica [m]

g – Aceleração da gravidade [m/s^2]

β – Coeficiente de dilatação térmica [ºC^{-1} – k^{-1}]

A – Área [m^2]

ΔT – Gradiente de temperatura [ºC – K]

c_p – Calor específico a pressão constante [J/(kg.ºC) – J/(kg.K)]

τ – Tensão de corte [N/m^2]

μ – Viscosidade dinâmica [(N.s)/m^2]

ν – Viscosidade cinemática [m^2/s]

ρ – Massa volúmica [kg/m^3]

Nu – Número de Nusselt = $h_c l / \lambda$

Re – Número de Reynolds = vl / ν

Ec – Número de Eckert = $v^2 /(c_p \Delta T)$

Gr – Número de Grashof = $gl^3 \beta \ \Delta T / \nu^2$

Pr – Número de Prandtl = $\mu \ c_p / \lambda$

Ra – Número de Raleigh = $g\beta \ \Delta T \ l^3 /(\nu\alpha)$

E – Poder emissivo [W/m^2]

E – Emissividade hemisférica

σ – Constante de Stefan-Boltzmann [W/(m^2.K^4)]

ε – Emissividade

e – Espessura [m]

λ – Comprimento de onda [μm]

α – Absorvidade

ρ – Reflectividade

ζ –Transmissividade

J – Radiosidade [W/m^2]

G – Irradiação [W/m^2]

F – Factor de forma

c – Convecção

r – Radiação

b – Corpo negro

λ – Monocromático

BSI – British Standard Institution

CEN – European Committee for Standardization

CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

EC6 – Eurocódigo 6

ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ITE – Informação Técnica de Edifícios

ISO – International Organization for Standardization

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

RSCI – Regulamento de Segurança Contra Incêndio

RGSCIE – Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndio em Edifícios

1

INTRODUÇÃO

1.1. OBJECTIVOS

As paredes de alvenaria em Portugal têm sido construídas frequentemente sem grandes cuidados, o que tem estado na origem da existência de várias patologias. Com a entrada em vigor de vários regulamentos, as paredes de alvenaria começaram a ser alvo de maiores exigências.

As causas das referidas patologias podem ser muitas, entre as quais se encontram a variação de temperatura, a acção da humidade, a deformação excessiva do suporte, o apoio insuficiente, e a retracção e expansão dos materiais.

É nesta perspectiva que nasce este trabalho que tem como finalidade aprofundar o conhecimento sobre a influência das variações de temperatura no desempenho mecânico das paredes de alvenaria, ou seja, pretende-se conhecer se o diferencial de temperatura pode induzir um estado de tensão que seja responsável por algumas das anomalias existentes na construção em Portugal.

Para se elaborar este estudo foi necessário desenvolver um trabalho integrado, ou seja, efectuou-se um estudo conjunto da análise térmica com os problemas mecânicos. É importante referir que este problema é bastante complexo, resultando daqui que esta abordagem tem que ser necessariamente pouco desenvolvida, face ao tempo disponível, ou seja, trata-se de um estudo inicial acerca da influência das variações de temperatura no comportamento mecânico das paredes de alvenaria exteriores.

Fundamentalmente pretende-se contribuir para um maior conhecimento dos modelos de comportamento mecânico das paredes de alvenaria não confinadas, quando sujeitas a variações de temperatura, analisando qual a solução de parede que se comporta melhor nestas condições.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído por duas partes distintas, mas que se complementam. A primeira parte diz respeito:

- às exigências funcionais dos materiais utilizados na execução das paredes da envolvente e delas próprias;
- aos métodos de determinação das características térmicas dos materiais e produtos para alvenaria;
- às principais causas das anomalias visualizadas nas paredes.

Esta componente tem assim um carácter informativo, procurando apresentar as principais exigências que devem ser respeitadas aquando da execução de uma parede de alvenaria.

A segunda componente, mais experimental, respeita à análise numérica de três soluções de parede, mais correntes em Portugal. Nesta análise pretende-se conhecer realmente qual a influência das variações de temperatura para o estado global das paredes de alvenaria.

Para a simulação numérica utilizou-se um programa de elementos finitos disponível na FEUP – *ABAQUS* – com possibilidade de modelar o comportamento térmico e mecânico.

O trabalho é desenvolvido ao longo de sete Capítulos.

Após esta apresentação do trabalho, o Capítulo 2 procura efectuar a síntese das exigências dos materiais utilizados na execução de paredes e das principais exigências que as paredes da envolvente devem respeitar.

O Capítulo 3 é dedicado aos métodos de determinação das características térmicas dos materiais e produtos para alvenaria, com particular destaque para a forma de determinação da resistência térmica dos alvéolos.

O capítulo 4 procura fazer a síntese das exigências dos revestimentos das paredes de alvenaria utilizados correntemente em Portugal, como os rebocos tradicionais e não tradicionais de ligantes hidráulicos, revestimentos de pedra natural, sistema ETICS e revestimentos por elementos descontínuos com função de acabamento.

O capítulo 5 é dedicado à descrição das principais causas de fissuração de paredes exteriores de alvenaria, procurando também mostrar que a disposição das paredes de alvenaria relativamente à estrutura poderá influenciar em muito essas anomalias.

No capítulo 6 descreve-se o modelo de simulação numérica utilizado, referindo os pressupostos em que o mesmo se fundamentou e os resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo 7 referem-se as principais conclusões deste trabalho de simulação e sugerem-se futuras vias de desenvolvimento.

2

SÍNTESE EXIGENCIAL DOS ELEMENTOS E DAS PAREDES DE ALVENARIA

2.1. GENERALIDADES

As paredes exteriores são um elemento construtivo sobre o qual recaem uma multiplicidade de exigências, onde se destacam como mais significativas as seguintes:

- estabilidade;
- segurança ao fogo;
- conforto acústico;
- conforto termohigrométrico;
- estanquidade à água da chuva;
- durabilidade;
- instalações embebidas.

As paredes mais correntes são em alvenaria. Estas têm por base unidades e argamassa, podendo ser revestidas ou não.

As exigências mais importantes relativas às unidades de alvenaria cerâmicas e de betão são as que se encontram presentes na normalização em vigor, tais como:

- dimensões;
- percentagem de furação;
- massa volúmica seca;
- absorção de água;
- permeabilidade ao vapor de água;
- expansão com a humidade;
- resistência à compressão;
- teor em sais solúveis activos;
- propriedades térmicas;
- reacção ao fogo;
- aderência;
- resistência ao gelo/degelo.

As unidades usadas com maior frequência em paredes de alvenaria são as cerâmicas e as de betão.

As unidades de alvenaria cerâmicas podem ser divididas em dois grupos distintos, designados por LD e HD. Os elementos do tipo LD possuem uma baixa massa volúmica seca (inferior ou igual a 1000

kg/m^3) e destinam-se a uma utilização em alvenaria protegida, enquanto que os elementos do tipo HD são utilizados em alvenaria não protegida, mas também em alvenaria protegida por possuírem uma massa volúmica seca elevada (superior a 1000 kg/m^3).

Apresenta-se de seguida a quantificação das exigências e a forma de avaliação do desempenho, sempre que possível de forma quantificada, ou apenas de forma qualitativa nas outras situações. Para esta apresentação recorreu-se a vária normalização em vigor e de referência.

2.2. UNIDADES DE ALVENARIA CERÂMICAS E DE BETÃO

2.2.1. EXIGÊNCIAS DIMENSIONAIS

As dimensões das unidades de alvenaria cerâmicas e de betão devem ser declaradas pelo fabricante, em mm, para comprimento, largura e altura, por esta ordem.

O produto deve possuir uma declaração do fabricante relativa à categoria de tolerância. Pela NP EN 771-1 [1] e pela NP EN 772-16 [2], em função da utilização prevista para as unidades cerâmicas, a realização do ensaio de determinação das dimensões não deverá produzir valores superiores às tolerâncias apresentadas no Quadro 2.1, no caso dos materiais cerâmicos.

As dimensões de fabrico das unidades são especificadas pelo seu produtor, com as quais as dimensões reais devem estar em conformidade, dentro dos desvios admissíveis.

Quadro 2.1 – Tolerâncias dimensionais das unidades de alvenaria cerâmicas, segundo a NP EN 771-1 [1]

Categorias de tolerâncias	Valores admissíveis
T1	$\pm 0{,}4\sqrt{\text{dimensão de fabrico em mm}}$ ou 3 mm, tomando o maior valor
T2	$\pm 0{,}25\sqrt{\text{dimensão de fabrico em mm}}$ ou 2 mm, tomando o maior valor
Tm	Tolerância, em mm, declarada pelo fabricante

A amplitude dimensional da amostra, ou seja, a diferença entre o maior e o menor valor da dimensão determinada nos elementos, é determinada de acordo com a NP EN 772-16 [2], devendo situar-se numa das categorias apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Amplitudes dimensionais das unidades de alvenaria cerâmicas, segundo a NP EN 771-1 [1]

Categorias de amplitudes	Valores admissíveis
R1	$\pm 0{,}6\sqrt{\text{dimensão de fabrico em mm}}$
R2	$\pm 0{,}3\sqrt{\text{dimensão de fabrico em mm}}$
Rm	Amplitude, em mm, declarada pelo fabricante

As tolerâncias definidas para as dimensões efectivas exteriores das unidades de betão, relativamente às dimensões nominais de fabrico, são as constantes no Quadro 2.3, devendo ser declaradas pelo fabricante. A determinação das dimensões das unidades de betão deverá ser efectuada de acordo com a NP EN 772-16 [2].

É importante salientar que as dimensões das unidades devem situar-se dentro dos desvios dimensionais máximos permitidos pela EN 771-3 [3], ou seja, devem encontrar-se entre os limites máximo e mínimo, em função das tolerâncias dimensionais apresentadas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Tolerâncias dimensionais das unidades de alvenaria de betão em milímetros, conforme a EN 771-3 [3]

Categorias de tolerâncias	D1	D2	D3
Comprimento	+3 -5	+1 -3	+1 -3
Largura	+3 -5	+1 -3	+1 -3
Altura	+3 -5	±2	±1,5

2.2.2. PERCENTAGEM DE FURAÇÃO

A percentagem de furação é a relação percentual entre a área de vazios e a área total aparente da secção.

A direcção segundo a qual se orienta a furação e a percentagem de furação devem ser declaradas pelo fabricante. A sua determinação deve ser realizada de acordo com a NP EN 772-3 [4], no caso das unidades cerâmicas, e com base na NP EN 772-2 [5] para as unidades de betão.

No caso das unidades de alvenaria cerâmicas, essa determinação é efectuada por pesagem hidrostática, NP EN 772-3 [4]. O ensaio consiste em imergir a amostra em água durante pelo menos uma hora, pesando-se de seguida a massa aparente da amostra na água e a massa da amostra em contacto com o ar. Com base nestes valores é possível calcular a percentagem de furação da amostra.

A determinação da percentagem de furação nas unidades de betão é efectuada por impressão em papel, segundo a norma NP EN 772-2 [5]. Para tal é necessário colocar uma folha de papel sobre ou sob a unidade de alvenaria, em função do ensaio a realizar, isto é, simultaneamente nas duas faces ou não. Com base na impressão marcada na folha de papel procede-se à determinação da respectiva percentagem de furação, por medição da geometria ou por pesagem. Com os resultados assim obtidos é possível obter o resultado pretendido.

De acordo com a percentagem de furação, o fabricante pode também declarar se as unidades estão conformes os limites de um dos grupos constantes no EC6: Part 1-1 [6], como se encontra no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Classificação das unidades em função da percentagem de furação, conforme o EC6: Part 1-1 [6]

Unidades de alvenaria	Percentagem de furação (% de volume bruto)			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
		Furação vertical		Furação horizontal
Unidades cerâmicas	≤25	>25; ≤55	≥25; ≤70	>25; ≤70
Unidades de betão	≤25	>25; ≤60	>25; ≤70	>25; ≤50

O EC6: Part 1-1 [6] define ainda outros requisitos geométricos a ter em consideração nas unidades de alvenaria, como as espessuras mínimas para os septos interiores e exteriores das unidades, conforme se apresenta no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Classificação das unidades de alvenaria em função da espessura dos septos, conforme o EC6: Part 1-1 [6]

Unidades de alvenaria	Espessuras mínimas dos septos interiores e exteriores (mm)						
	Grupo 1	Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
		Furação vertical				Furação horizontal	
		Septo interior	Septo exterior	Septo interior	Septo exterior	Septo interior	Septo exterior
Unidades cerâmicas	Não tem requisitos	≥5	≥8	≥3	≥6	≥5	≥6
Unidades de betão	Não tem requisitos	≥15	≥18	≥15	≥15	≥20	≥20

2.2.3. MASSA VOLÚMICA SECA

A massa volúmica seca das unidades de alvenaria cerâmicas, determinada conforme a NP EN 772-13 [7], deve ser declarada pelo fabricante (em kg/m^3), especificando também a categoria de tolerância, que corresponde a uma das indicadas no Quadro 2.6. Para estas unidades a massa volúmica seca deverá ser inferior ou igual a 1000 kg/m^3.

Quadro 2.6 – Tolerâncias admissíveis para a massa volúmica seca, de acordo com a NP EN 771-1 [1]

Categorias de tolerâncias	Valores admissíveis
D1	Máximo de 10%
D2	Máximo de 5%
Dm	Desvio percentual declarado pelo fabricante

A massa volúmica seca das unidades de alvenaria de betão deve ser declarada pelo fabricante (em kg/m^3), podendo ser determinada pela NP EN 772-13 [7]. O valor da massa volúmica seca não pode diferir ± 10% do valor declarado pelo fabricante.

2.2.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA

No caso das unidades cerâmicas do tipo LD (baixa massa volúmica), os requisitos relativos a estes parâmetros não são aplicáveis.

No entanto, para unidades cerâmicas do tipo HD (elevada massa volúmica), com uma utilização em paredes exteriores, com a face da unidade exposta, a absorção de água dos lotes deve ser declarada pelo fabricante (em %), devendo satisfazer as condições presentes nos Anexos A e C da NP EN 771-1 [1].

No caso das unidades de betão que se destinam a uma utilização em elementos exteriores expostos, o fabricante deve declarar o coeficiente máximo de absorção de água devido à acção da capilaridade na face do bloco exposto (em g/m^2.s).

A determinação do coeficiente de absorção de água destas unidades deve ser efectuada de acordo com a NP EN 772-11 [8] para uma imersão durante um período de 10±0,2 minutos, tendo os resultados que

estar de acordo com o Anexo B.1 da NP EN 771-3 [3] e não podendo ser superiores ao valor declarado pelo fabricante.

2.2.5. PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

Quando as unidades se destinam a uma utilização em panos exteriores, o fabricante deve fornecer informação relativa à permeabilidade ao vapor de água por meio de valores tabelados do coeficiente de vapor de água apresentados na NP EN 1745 [9]. No caso das unidades de alvenaria de betão o fabricante pode ainda declarar o coeficiente de difusão de vapor de água com base no valor determinado de acordo com a EN ISO 12572 [10].

2.2.6. EXPANSÃO COM A HUMIDADE

A expansão com a humidade consiste no aumento das dimensões do corpo cerâmico devido à absorção de água, podendo ter grande influência na vida útil dos materiais cerâmicos e produzir efeitos graves nas paredes.

Assim, os requisitos relativos à expansão com a humidade devem ser declarados (em mm/m) em conformidade com a EN 772-19 [11] para unidades cerâmicas de furação horizontal, com uma dimensão igual ou superior a 400 mm e uma espessura externa menor que 12 mm, destinadas a serem rebocadas.

O ensaio para a determinação da expansão com a humidade das unidades de alvenaria cerâmicas, EN 772-19 [11], baseia-se na medição da variação do comprimento da amostra, devido à imersão das mesmas em água em ebulição durante um período de 24 horas, conforme a fig. 2.1.



Fig. 2.1 – Determinação da expansão com a humidade

2.2.7. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência média à compressão das unidades de alvenaria cerâmicas e de betão deve ser declarada pelo fabricante (em N/mm^2), deve também declarar a resistência à compressão normalizada quando requerido e a categoria à qual pertencem as unidades, conforme o Quadro 2.7. A determinação da resistência à compressão deve ser efectuada de acordo com a NP EN 772-1 [12].

Para a determinação da resistência à compressão, com base na norma referida [12], os provetes, depois de preparados são colocados e centrados sobre o prato da máquina de ensaio à compressão, sendo-lhe aplicada uma carga uniformemente distribuída e incrementada até à rotura. Assim, o valor da resistência á compressão resulta da razão entre a carga máxima atingida e a área do provete carregada.

A resistência à compressão normalizada é obtida a partir da resistência à compressão, determinada como se referiu anteriormente, afectada de um factor de forma. Esta correcção deve-se ao facto de as unidades de alvenaria serem ensaiadas com diferentes dimensões, o que implica uma diferença ao nível das resistências. Assim, para que os resultados possam ser comparados entre si, a norma NP EN 772-1 [12] prevê a correcção da resistência à compressão através da utilização desse factor de forma, que é função das dimensões dos provetes após a regularização das faces.

Quadro 2.7 – Categorias das unidades de alvenaria em termos de resistência à compressão, conforme a NP EN 771-1 [1]

Categoria	Definição
Categoria I	Unidades de alvenaria com um valor médio de resistência à compressão especificado cuja probabilidade de não ser atingido não exceda os 5%.
Categoria II	Unidades de alvenaria não destinadas a verificar o nível de confiança das unidades de Categoria I.

2.2.8. TEOR EM SAIS SOLÚVEIS ACTIVOS

No caso das unidades de betão, a norma EN 771-3 [3] não faz qualquer referência à determinação do teor em sais solúveis activos, pelo que não é necessário proceder à realização do respectivo ensaio.

O teor em sais solúveis activos deve ser controlado nas unidades de alvenaria cerâmicas, devendo ser declarado pelo fabricante. Quando a utilização prevista para as unidades cerâmicas garante a protecção contra a penetração da água, não existe requisito para o teor em sais solúveis activos (S0). As unidades devem ser ensaiadas de acordo com a NP EN 772-5 [13], não devendo apresentar valores superiores aos estipulados no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 – Categoria dos teores em sais solúveis activos das unidades de alvenaria cerâmicas, conforme a NP EN 771-1 [1]

Categoria de teores em sais solúveis activos	Percentagem (%) total em massa inferior ou igual a:	
	Na^+ e K^+	Mg^{2+}
S0	Sem requisito	Sem requisito
S1	0,17	0,08
S2	0,06	0,03

O ataque dos sulfatos (potássio, sódio e magnésio), nas unidades cerâmicas, só ocorre se houver uma passagem de água em quantidade significativa através da alvenaria, devido a infiltrações. Daí a necessidade de declarar a categoria de teor em sais solúveis activos, de modo a assegurar que, em condições especiais de utilização, não ocorram danos nas unidades de alvenaria, argamassas ou reboco (se existir).

Os sulfatos solúveis, em especial o sulfato de magnésio, são susceptíveis de danificar as próprias unidades de alvenaria cerâmicas, pelo efeito designado de criptoflorescências[1], apresentando por isso requisitos mais exigentes que os restantes. Na fig. 2.2 apresenta-se uma patologia típica em fachadas de face à vista devido ao efeito das eflorescências.



Fig. 2.2 – Criptoflorescências em fachadas de unidades de face à vista

2.2.9. PROPRIEDADES TÉRMICAS

O fabricante deve fornecer informação sobre as propriedades térmicas da alvenaria, unidades cerâmicas e de betão, (resistência térmica (m^2.ºC/W) ou condutibilidade térmica (W/m.ºC)), em função da utilização prevista e sempre que a alvenaria seja utilizada em elementos com requisitos de isolamento térmico, devendo especificar se a declaração é baseada numa tabela, em ensaios ou em cálculos, de acordo com a NP EN 1745 [9].

2.2.10. REACÇÃO AO FOGO

A classe de reacção ao fogo das unidades de alvenaria cerâmicas e de betão deve ser declarada pelo fabricante sempre que as unidades sejam utilizadas em elementos com requisitos de resistência ao fogo.

Para unidades de alvenaria contendo menos de 1% em massa ou volume (consoante o que for mais desfavorável) de materiais orgânicos distribuídos de forma homogénea, a declaração pode indicar a classe A1 de reacção ao fogo, sem necessidade de ensaios. No caso de unidades de alvenaria contendo mais de 1% da massa acima referida devem ser classificados segundo a EN 13501-1 [14] e indicada a classe apropriada de reacção ao fogo.

2.2.11. ADERÊNCIA

A aderência/resistência inicial ao corte consiste na resistência de corte que a argamassa desenvolve na superfície de contacto com as unidades de alvenaria.

Assim, a aderência combinada entre as unidades de alvenaria (cerâmicas ou de betão) e a argamassa deve ser declarada em termos da resistência inicial ao corte (em N/mm^2), conforme a NP EN 1052-3

[1] As criptoflorescências são manchas brancas visíveis nas unidades de alvenaria devido aos sais solúveis presentes no reboco, no suporte ou água infiltrada. Normalmente ocorre devido à presença prolongada de humidade.

[15], sempre que os elementos sejam utilizados com requisitos estruturais. A declaração tanto pode ser feita com base em valores tabelados ou em ensaios, não devendo a resistência característica ser inferior ao valor declarado.

A resistência inicial ao corte da alvenaria, NP EN 1052-3 [15], é determinada a partir da resistência de pequenos provetes de alvenaria, ensaiados até à rotura. Em função das dimensões das unidades de alvenaria estão previstos dois provetes diferentes, isto é, quando a altura das unidades é inferior ou igual a 200 mm, obtém-se um provete com duas juntas horizontais de argamassa, caso a altura seja superior a 200 mm, o provete tem apenas uma junta horizontal, conforme a fig. 2.3.

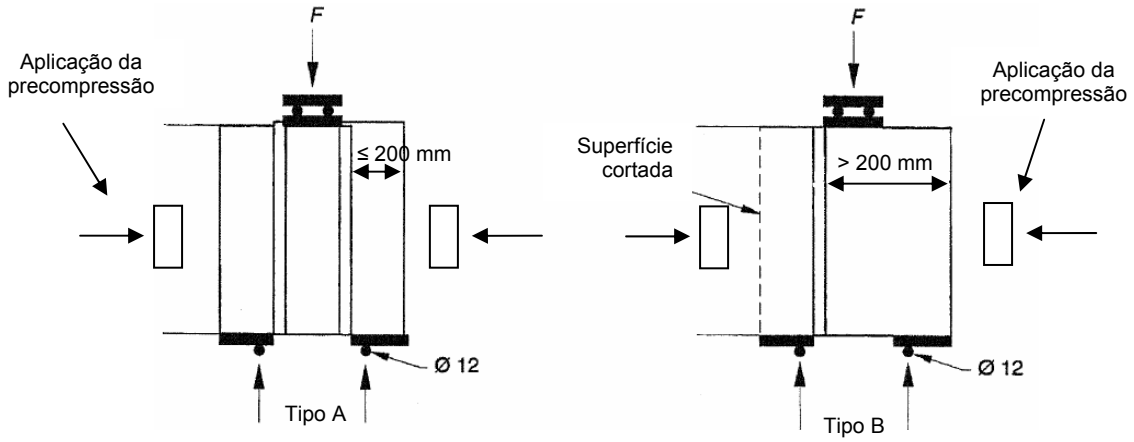


Fig. 2.3 – Colocação dos provetes na máquina [15]

Os provetes são ensaiados ao corte segundo quatro pontos de aplicação da carga, devendo submeter-se ao ensaio pelo menos três provetes, com vários níveis de precompressão perpendicular às juntas horizontais. A resistência inicial ao corte é definida pela curva de regressão linear para a tensão normal nula.

2.2.12. RESISTÊNCIA AO GELO/DEGELO

Quando o uso pretendido para o produto (unidades de alvenaria cerâmicas ou de betão) prevê somente uma protecção limitada (por exemplo, camada fina de reboco), e caso se apliquem os requisitos de gelo/degelo, a protecção deve ser avaliada e declarada em conformidade com as disposições em vigor no local de utilização das unidades (para a caracterização da exposição ver o Anexo B da NP EN 771-1 [1]).

No entanto, quando se prevê a aplicação de uma protecção completa contra a penetração da água (por exemplo, camada espessa de reboco adequado, revestimento, paramento interior de parede dupla, paredes interiores) não é necessária qualquer referência à resistência gelo/degelo (F0).

O grau de exposição traduz o risco da alvenaria se encontrar exposta a elevados teores de humidade, coincidindo com ciclos de gelo/degelo, devido a condições climatéricas locais combinadas com a concepção da construção. Os factores que fazem parte da avaliação da exposição são as condições de temperatura e humidade, bem como a ocorrência de substâncias agressivas.

A influência dos revestimentos de superfície deve ser avaliada, particularmente a que se refere aos revestimentos de camada fina.

As classes de exposição para uma durabilidade adequada contra o gelo/degelo são as que se encontram no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 – Classes de exposição para uma durabilidade adequada contra o gelo/degelo, de acordo com a NP EN 771-1 [1]

Classes	Definição
F0	Exposição passiva
F1	Exposição moderada
F2	Exposição severa

2.3. PAREDES DA ENVOLVENTE

2.3.1. ESTABILIDADE

As paredes, particularmente as constituintes da envolvente, devem ser concebidas por forma a satisfazerem a segurança regulamentar relativamente a todas as acções actuantes sobre a parede durante a vida da obra.

As acções a considerar serão evidentemente diferentes no caso das paredes terem ou não função estrutural, devendo em qualquer dos casos assegurar-se a verificação da estabilidade para o conjunto de acções aplicáveis em cada caso. Embora a verificação da estabilidade das paredes possa ser efectuada por métodos de análise estrutural, ou através de verificação experimental, é importante garantir na fase de concepção da mesma a interacção com toda a estrutura e construção da qual a parede faz parte, obtendo-se normalmente a necessária rigidez e estabilidade, através de uma espessura adequada relativamente à altura e comprimento da parede.

No entanto, o emprego de alvenarias de preenchimento em edifícios correntes, tendo como base paredes com espessuras habituais, não põe problemas especiais de estabilidade. A estabilidade sob acção do vento ou acções de impacto para pés-direitos correntes pode ser verificada quer através de cálculos quer através da realização de ensaios.

A articulação da alvenaria com a estrutura do edifício e a necessidade de limitar o desenvolvimento da alvenaria entre juntas de dilatação deverão ser particularmente estudadas, por forma a evitar fissuração.

O comportamento mecânico da parede sob acções horizontais do vento é melhorado com as juntas verticais de assentamento preenchidas.

O comportamento destas alvenarias em zonas com concentração de esforços, ou condições mais desfavoráveis, pode ser melhorado pela inclusão de armaduras apropriadas a esse fim.

O EC6: Part 1-1 [6] define qual a espessura mínima e a esbelteza[2] máxima, em paredes sujeitas à acção do vento, por forma a que a parede possua uma rigidez e estabilidade adequada relativamente à altura e comprimento da parede. Desta forma, a espessura mínima de uma parede resistente estipulada pela norma é de 150 mm e a esbelteza máxima não deve exceder 27.

[2] Esbelteza é o quociente entre a altura efectiva (distância entre os elementos contíguos de travamento, como por exemplo, elementos estruturais) e a espessura efectiva da parede.

2.3.2. SEGURANÇA AO FOGO

As alvenarias devem ser concebidas para terem um comportamento face ao fogo apropriado à sua utilização.

Com base no RSCI – *Regulamento de Segurança Contra Incêndio – Edifícios de Habitação* [16], actualmente em vigor, o comportamento ao fogo dos materiais de construção e elementos construtivos caracteriza-se através dos seguintes indicadores:

- reacção ao fogo: contributo do material para a origem e desenvolvimento do incêndio, sendo a qualificação dos materiais feita através de 5 classes (M0 a M4, correspondendo os limites a materiais não combustíveis e a materiais facilmente inflamáveis, respectivamente);
- resistência ao fogo: comportamento face ao fogo de elementos construtivos, relativamente à manutenção das funções que tais elementos devem desempenhar em caso de incêndio, avaliando-se pelo tempo que decorre desde o início de um processo térmico normalizado a que o elemento é submetido até ao momento em que este deixa de satisfazer as exigências relacionadas com as suas funções. De acordo com as exigências os elementos classificam-se como estáveis ao fogo (estabilidade), pára-chamas (estanquidade) e corta-fogo (estabilidade e isolamento térmico), em que a classificação sob estes pontos de vista é efectuada em escalões de tempo de 15 a 360 minutos.

No entanto, e tendo em conta o novo RGSCIE – *Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndio em Edifícios*, aprovado pelo Decreto-Lei nº 83/2007 [17], esta caracterização não será efectuada com base nas mesmas especificações, sendo possível fazer-se uma equivalência entre as especificações do LNEC, na qual o regulamento actualmente em vigor se baseia, e as do Sistema Europeu, como se apresenta no Quadro 2.10 e no Quadro 2.11.

Quadro 2.10 – Reacção ao fogo de produtos de construção com excepção de revestimentos de piso [17]

Classificação de acordo com as especificações do LNEC	Classificação segundo o Sistema Europeu		
	Classes	Classificação complementar	
		Produção de fumo	Queda de gotas / partículas inflamadas
M0	A1	-	-
	A2	S1	d0
M1	A2	Não exigível	d0
	B	Não exigível	d0
M2	A2; B	Não exigível	d1
	C	Não exigível	d0; d1
M3	D	Não exigível	d0; d1
M4	A2; B; C; D	Não exigível	d2
	E	-	Ausência de classificação ou d2
Sem classificação	F	-	-

É importante referir que a classificação complementar definida no Quadro 2.10 é determinada através de ensaios especificados nas normas EN 13823 [18] e EN ISO 11925-2 [19]. Assim, a determinação da produção de fumo baseia-se na EN 13823 [18] através da determinação do índice SMOGRA (taxa

de desenvolvimento de fumo) e da produção total de fumo num período definido de 600 seg. (TSP_{600s}), distinguindo-se as exigências da seguinte forma:

- S1: SMOGRA ≤ 30 $m^2.s^{-2}$ e $TSP_{600s} \leq 50$ m^2;
- S2: SMOGRA ≤ 180 $m^2.s^{-2}$ e $TSP_{600s} \leq 200$ m^2;
- S3: nem S1 nem S2.

No caso da queda de gotas/partículas inflamadas, a sua determinação baseia-se na norma EN ISO 11925-2 [19], que consiste na avaliação da facilidade de ignição de um produto qualquer sujeito à incidência directa de uma pequena chama, sendo no âmbito deste ensaio aplicável a uma folha de papel. As exigências são definidas da seguinte forma:

- d0: não se verifica a libertação de gotas/partículas inflamadas em 600 seg.;
- d1: não se verifica a libertação de gotas/partículas inflamadas com duração superior a 10 seg. em 600 seg.;
- d2: nem d0 nem d1. A ignição do papel no ensaio determina a classificação d2;
- Ausência de classificação: ausência de ignição do papel no ensaio.

Quadro 2.11 – Resistência ao fogo padrão de produtos de construção [17]

Função do elemento	Classificação de acordo com as especificações LNEC	Classificação segundo o Sistema Europeu
Suporte de cargas	EF (estável ao fogo)	R
Suporte de cargas e estanquidade a chamas e gases quentes	PC (pára-chamas)	RE
Suporte de cargas, estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	CF (corta-fogo)	REI
Estanquidade a chamas e gases quentes	PC (pára-chamas)	E
Estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	CF (corta-fogo)	EI

Com base nesta informação foi possível identificar as novas exigências para paredes exteriores constantes da proposta do novo regulamento para qualquer tipo de edifício, como se descreve seguidamente.

As paredes exteriores dos edifícios em confronto com outros devem garantir, no mínimo, a classe de resistência ao fogo padrão EI 60 ou REI 60, sempre que a distância entre os edifícios for inferior à indicada no Quadro 2.12, quando nenhum dos edifícios possuir espaços afectos à utilização-tipo XII sem comunicações interiores comuns com outra utilização-tipo. Na utilização-tipo XII encontram-se integrados edifícios industriais, oficinas e armazéns que correspondem a edifícios, partes de edifícios ou recintos ao ar livre, não recebendo habitualmente público, destinados ao exercício de actividades industriais ou ao armazenamento de materiais, substâncias, produtos ou equipamentos, oficinas de reparação e todos os serviços auxiliares ou complementares destas actividades.

Quadro 2.12 – Condições de protecção de vãos de fachada em confronto [17]

Altura do edifício (H)	Distância mínima entre fachadas (L)
H ≤ 9 m	L < 4 m
H > 9 m	L < 8 m

Nos edifícios com mais de um piso em elevação, a classe de reacção ao fogo dos revestimentos exteriores aplicados directamente sobre fachadas, deve ser, pelo menos, a indicada no Quadro 2.13, de acordo com a altura do edifício.

Quadro 2.13 – Reacção ao fogo de revestimentos exteriores sobre fachadas [17]

Altura (H)	Fachadas sem aberturas - Revestimentos
H ≤ 28 m	D – s3 d1
H > 28 m	C – s3 d1

Nos edifícios com mais de um piso em elevação, a classe de reacção ao fogo dos elementos de revestimento descontínuos, fixados mecanicamente ao suporte e afastados da fachada deixando uma caixa-de-ar deve respeitar os valores indicados no Quadro 2.14.

Quadro 2.14 – Reacção ao fogo de elementos de revestimento exterior criando caixa-de-ar [17]

Elemento	Edifícios com H ≤ 9 m	Edifícios com 9 < H ≤ 28 m	Edifícios com H > 28 m
Estrutura de suporte do sistema de isolamento	C – s2 d0	B – s2 d0	A2 – s2 d0
Revestimento da superfície externa e das que confinam o espaço de ar ventilado	C – s2 d0	B – s2 d0	A2 – s2 d0
Isolamento térmico	D – s3 d0	B – s2 d0	A2 – s2 d0

A classe de reacção ao fogo dos sistemas compósitos para isolamento exterior com revestimento sobre isolante (ETICS) e do material de isolamento térmico que integra esses sistemas, em edifícios com mais de um piso em elevação, deve ser pelo menos, a indicada no Quadro 2.15.

Quadro 2.15 – Reacção ao fogo dos sistemas compósitos para isolamento térmico pelo exterior, com revestimento sobre isolante e do material de isolamento térmico [17]

Elemento	Edifícios com H ≤ 9 m	Edifícios com 9 < H ≤ 28 m	Edifícios com H > 28 m
Sistema completo	C – s3 d0	B – s3 d0	B – s2 d0
Isolamento térmico	E – d2	E – d2	B – s2 d0

No caso de paredes exteriores de empena deve garantir-se uma resistência ao fogo padrão da classe EI 60 para edifícios de altura inferior ou igual a 28 m, ou da classe EI 90 nas restantes situações, excepto se for exigível uma classe mais gravosa devido às utilizações-tipo do edifício.

No que se refere à resistência ao fogo de elementos estruturais, consoante o seu tipo, devem possuir uma resistência que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante todas as fases de combate ao incêndio, incluindo o rescaldo, ou em alternativa devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima indicada no Quadro 2.16.

Quadro 2.16 – Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios [17]

Função elemento estrutural	Categorias de risco (*)				Utilizações-tipo (**)
	1ª Categoria	2ª Categoria	3ª Categoria	4ª Categoria	
Apenas suporte	R 30	R 60	R 90	R 120	I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X
Suporte e compartimentação	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	
Apenas suporte	R 60	R 90	R 120	R 180	II, XI, XII
Suporte e compartimentação	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	

(*) O RGSCIE classifica cada utilização-tipo em 4 categorias de risco, a que corresponderão exigências de segurança crescente. Essa classificação será diferente para cada utilização-tipo, e terá em consideração factores como a altura, a área, o efectivo e a carga de incêndios.

(**) Atendendo ao uso de cada edifício são definidas doze utilizações-tipo, como por exemplo, habitacionais, estacionamentos, administrativos, etc.

2.3.3. CONFORTO ACÚSTICO

O isolamento aos ruídos aéreos exteriores, entendido como o abaixamento do nível dos ruídos aéreos exteriores que atravessam a parede, é avaliado através do isolamento sonoro médio das paredes exteriores, incluindo zonas transparentes, caracterizado pelo factor $D_{2m,n,w}$ (em dB).

O sistema deve satisfazer os requisitos de isolamento sonoro aplicado a paredes em contacto com o exterior de acordo com o RRAE – *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios* [20], em que para zonas mistas $D_{2m,n,w} \geq 33$ dB e para zonas sensíveis $D_{2m,n,w} \geq 28$ dB.

É de salientar que estes parâmetros são facilmente obtidos para a zona opaca da parede exterior face às espessuras correntes ou recomendadas. No entanto, quando colocada em conjunto com zonas envidraçadas tal é mais difícil de atingir, devido ao comportamento menos eficiente do vidro.

2.3.4. CONFORTO TERMOHIGROMÉTRICO

As paredes da envolvente devem apresentar uma resistência satisfatória à passagem de calor, visando assegurar os níveis de conforto térmico considerados razoáveis e limitar os consumos de energia em aquecimento e arrefecimento.

O RCCTE – *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* [21] estabelece os valores máximos admissíveis para o coeficiente de transmissão térmica[3] da parede, *U*, em função das zonas climáticas em que o país se divide por forma a minimizar o risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente, conforme o Quadro 2.17 e de acordo com a Directiva 2002/91/CE. A divisão do país em função das zonas climáticas pode ser visualizada na fig. 2.4.

No Quadro 2.17 são ainda apresentados os valores de referência dos coeficientes de transmissão térmica, que isentam a demonstração detalhada do cumprimento do RCCTE [21] em edifícios de habitação com uma área útil inferior a 50 m^2.

[3] O coeficiente de transmissão térmica é definido como sendo a quantidade de calor que, por unidade de tempo, atravessa uma superfície de área unitária por unidade de diferença de temperatura, entre os ambientes que separa.

Quadro 2.17 – Valores máximos do coeficiente de transmissão térmica de paredes segundo o RCCTE [21]

U (W/(m^2.ºC))	Zona Climática			
	I_1	I_2	I_3	RA (*)
Valor máximo de referência para zonas opacas verticais da envolvente exterior	0,70	0,60	0,50	1,40
Valor máximo admissível para zonas opacas verticais da envolvente exterior	1,80	1,60	1,45	-

(*) Regiões Autónomas da Madeira e Açores, apenas para edifícios na zona I_1

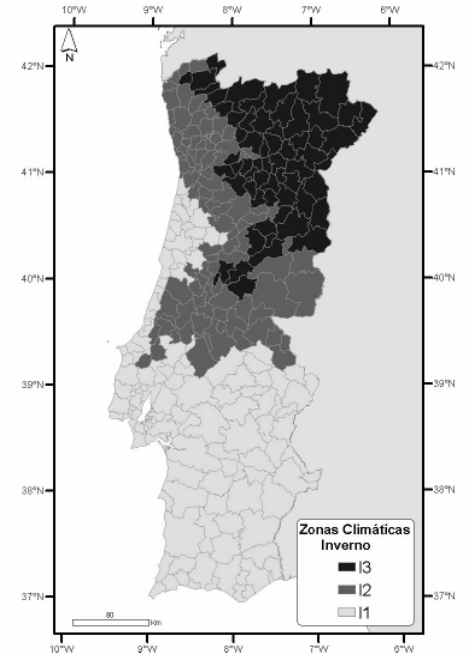


Fig. 2.4 – Divisão de Portugal Continental em função das zonas climáticas de Inverno [21]

É importante garantir que os paramentos interiores das paredes se apresentem isentos de humidade de condensação, por requisitos de conforto e durabilidade. Assim, a secura desses paramentos interiores e o risco de condensação superficial são controlados da seguinte forma:

- garantir que em condições normais de utilização, as temperaturas do paramento interior sejam superiores à temperatura de ponto de orvalho do ambiente interior;
- limitando o coeficiente de transmissão térmica da parede a um máximo função da localização da construção, de acordo com referido no RCCTE [21], Quadro 2.17.

2.3.5. ESTANQUIDADE À ÁGUA DA CHUVA

A envolvente das construções, incluindo naturalmente a parte opaca, deve assegurar a minimização dos efeitos associados à incidência da água da chuva. A minimização desses efeitos traduz-se na ausência de infiltrações para o interior devido à chuva incidente, acompanhada de vento e na ausência de infiltrações no seio da parede que provoquem o seu humedecimento prolongado originando a deterioração da mesma.

Estes objectivos são possíveis de atingir adequando as soluções construtivas, incluindo tosco e revestimento, às condições locais de chuva incidente associada a vento.

O mecanismo de penetração da água está associado à quantidade, tipo e dimensão dos poros constituintes da parede, à sua capacidade de absorverem a água superficial que por gravidade escorre pela parede e, sobretudo, à ocorrência de fissuras, em que a simples acção da gravidade ou a acção conjugada da chuva e vento asseguram um caminho para a penetração da água para o seu interior. A existência de descontinuidades nas paredes, materializadas por câmaras de ar ou a interrupção da argamassa de assentamento nas juntas, são importantes em termos de estanquidade à água da chuva, uma vez que funcionam como cortes de capilaridade dificultando o percurso da água para o interior (caso das paredes duplas).

Na análise do comportamento à água da chuva das paredes à que considerar os seguintes factores:

- clima e exposição do local;
- constituição dos revestimentos;
- constituição do tosco da parede (como as características dos elementos, espessuras do pano, tipo de juntas e argamassas de assentamento);
- configuração arquitectónica do edifício;
- qualidade de execução.

Em diversos países existem zonamentos e classificações sob o ponto de vista da chuva incidente devido à acção do vento (índice de chuva incidente e índice de chuva incidente persistente[4]), conforme se mostra no Quadro 2.18 relativamente ao critério adoptado na BS 5628: Part 3 [22] para a Grã-Bretanha. A partir desta classificação é possível, em função da localização geográfica e do grau de exposição, seleccionar as soluções construtivas mais adequadas para as paredes.

Quadro 2.18 – Classificação dos locais em termos de índice de chuva incidente persistente, segundo a BS 5628: Part 3 [22]

Exposição do local		Índice de chuva incidente persistente (l/m^2)
1	Abrigado	Menos do que 33
2	Moderado	Entre 33 e 56,5
3	Severo	Entre 56,5 e 100
4	Muito severo	Mais do que 100

Os revestimentos apresentam uma contribuição fundamental na satisfação dos requisitos de estanquidade à água da chuva, podendo utilizar-se revestimentos de estanquidade ou revestimentos de impermeabilização. Os revestimentos de estanquidade conseguem, em geral, por si só garantir a estanquidade à água exigível para o conjunto tosco/revestimento. Estes revestimentos mantêm as suas características de estanquidade mesmo no caso da ocorrência de fissuração limitada do suporte.

[4] Índice de chuva incidente – produto dos valores médios anuais de precipitação (m), pela velocidade do vento (m/s) para cada direcção considerada.

Índice de chuva incidente persistente – para cada direcção considerada, produto dos valores médios anuais de precipitação (m) pela velocidade do vento (m/s) e por um factor adimensional, função da velocidade e direcção do vento.

Os revestimentos de impermeabilização conferem uma protecção menor, sendo a estanquidade assegurada pelo conjunto tosco/revestimento. Embora este tipo de revestimento limite a quantidade de água que atinge o suporte, é o conjunto tosco/revestimento que assegura a estanquidade exigida. A conservação deste revestimento depende do comportamento do suporte, não conseguindo manter a capacidade de impermeabilização quando ocorre uma degradação excessiva daquele, como fissuração, por exemplo.

Os revestimentos influenciam de forma importante o desempenho das paredes exteriores em relação à estanquidade à água da chuva, sobretudo no caso de paredes simples, de tal forma que a regulamentação francesa, DTU 20.1 [23] interdita a utilização de paredes sem revestimento, com excepção da alvenaria de pedra, e as disposições inglesas BS 5628: Part 3 [22] só o permitem em zonas abrigadas, conforme se pode verificar no Quadro 2.19 e no Quadro 2.20.

As classes de exposição máximas recomendadas nos Quadros 2.19 e 2.20 encontram-se definidas anteriormente no Quadro 2.18, em função do índice de chuva incidente persistente.

Quadro 2.19 – Espessura mínima das paredes simples de unidades de alvenaria cerâmicas função da exposição do local à chuva incidente, segundo a BS 5628: Part 3 [22]

Espessura mínima (mm)	Exposição máxima recomendada			
	Unidades de alvenaria cerâmicas			
	À vista	Reboco de acordo com a BS 5262	Isolamento pelo exterior	Revestimento de placas ou chapas
90	Não rec.	1	3	4
215	1	2	3	4
328	1	3	3	4
440	2	3	3	4

Quadro 2.20 – Espessura mínima das paredes simples de unidades de alvenaria de betão função da exposição do local à chuva incidente, segundo a BS 5628: Part 3 [22]

Espessura mínima (mm)	Exposição máxima recomendada							
	Unidades de betão de agregados correntes				Unidades de betão de agregados leves			
	À vista	Reboco de acordo com a BS 5262	Isolamento pelo exterior	Rev. de placas ou chapas	À vista	Reboco de acordo com a BS 5262	Isolamento pelo exterior	Rev. de placas ou chapas
90	Não rec.	1	3	4	Não rec.	1	3	4
190	Não rec.	2	3	4	Não rec.	2	3	4
215	1	2	3	4	1	3	3	4
250	1	3	3	4	-	-	-	-
328	1	3	3	4	1	3	3	4
440	2	3	3	4	2	3	3	4

De acordo com os Quadros 2.19 e 2.20 é possível constatar que a espessura mínima das paredes, particularmente em pano simples, estabelece-se em função das condições de exposição do local à chuva incidente. Convém referir que os elementos cerâmicos têm na Grã-Bretanha geometrias muito diferentes das adoptadas em Portugal, pelo que, mesmo que as condições de exposição fossem idênticas às existentes em Portugal, a definição de espessuras propostas na norma inglesa, não seria directamente extrapolável para Portugal.

O documento normativo francês DTU 20.1 [23], mais adaptável à realidade portuguesa, uma vez que os materiais correntemente utilizados em França e as soluções construtivas são mais próximas das adoptadas em Portugal, estabelece a espessura das paredes exteriores em função dos seguintes factores:

- localização da construção: - a: no interior de grandes centros urbanos;
  - b: no interior de pequenos aglomerados ou periferia de grandes centros;
  - c: isolada em zona rural;
  - d: isolada junto ao mar.
- altura da parede acima do solo: - ≤ 6 m;
  - 6 até 18 m;
  - 18 até 28 m;
  - 28 até 50 m;
  - 50 até 100 m.
- existência de protecção: - parede abrigada;
  - parede não abrigada.

No caso de paredes simples, as espessuras mínimas são as constantes no Quadro 2.21, devendo as paredes ser revestidas.

A composição da argamassa de assentamento, a sua plasticidade e a aderência entre a argamassa e os elementos constituintes, são aspectos importantes em termos de estanquidade à água da chuva.

A qualidade de execução da parede é um outro factor importante, pois além de outros aspectos, um preenchimento incorrecto ou insuficiente das juntas pode facilitar a penetração da água.

Quadro 2.21 – Espessuras de tosco de paredes em pano simples de acordo com a DTU 20.1 [23]

Situação da parede	Espessura mínima de tosco (mm)		
	Unidades cerâmicas	Unidades de betão de agregados correntes	Unidades de betão de agregados leves
Abrigada	200	200	225
Não abrigada até 6 m	200 (1)	200 (1)	225 (1)
Não abrigada entre 6 e 18 m	275 (1)	275 (1)	225 (1)
Não abrigada entre 18 e 28 m	325(1)	325(1)	225(1)
Não abrigada, isolada junto ao mar, até 6 m	375(2)	275(2)	275(2)

(1) Excepto junto ao mar

(2) Excepto em frente ao mar, na 1ª linha junto ao mar

O tratamento arquitectónico das fachadas tem igualmente importância no comportamento à água da chuva da envolvente. A existência de fachadas muito lisas, com grandes envidraçados, conduz a um risco acrescido, enquanto que a existência de elementos salientes, como varandas, sacadas, cornijas e beirais, pode reduzir a exposição à chuva associada ao vento e diminuir o risco de penetração.

2.3.6. DURABILIDADE

A durabilidade da envolvente está associada ao número de anos em que a mesma conserva um desempenho satisfatório.

A durabilidade das paredes é muito condicionada pela quantidade de água que a parede contêm e como esta se comporta na presença de água. A água pode ser proveniente, entre outras origens da chuva ou da ascensão capilar.

A regulamentação europeia, EC6: Part 2 [24] define para as paredes com funções estruturais, as classes de exposição em função das condições ambientais a que a parede pode estar sujeita, tendo em consideração a sua localização. Essas classes de exposição, que se consideram em geral extrapoláveis para qualquer tipo de parede, são as seguintes:

- MX1 – em ambiente seco;
- MX2.1 – exposto à humidade, mas não exposto a um ciclo de gelo/degelo ou a fontes externas com níveis significativos de sulfatos ou de produtos químicos agressivos;
- MX2.2 – exposto à chuva severa mas não exposto a ciclos de gelo/degelo ou a fontes externas com níveis significativos de sulfatos ou de produtos químicos agressivos;
- MX3.1 – exposto à humidade ou chuva e a ciclos de gelo/degelo, mas não exposto a fontes externas com níveis significativos de sulfatos ou de produtos químicos agressivos;
- MX3.2 – exposto à chuva severa e a ciclos de gelo/degelo, mas não exposta a fontes externas com níveis significativos de sulfatos ou de produtos químicos agressivos;
- MX4 – exposto ao ar saturado de sal ou água do mar;
- MX5 – em ambiente químico agressivo.

Com base na informação contida no Quadro 2.22 é possível constatar que as especificações mínimas para as unidades de alvenaria, em termos da resistência ao gelo/degelo e aos teores em sais solúveis activos, é função das classes de exposição.

Quadro 2.22 – Especificações mínimas para as unidades de alvenaria em função das classes de exposição, conforme o EC6: Part 2 [24]

Classes de exposição	Unidades de alvenaria cerâmicas	Unidades de alvenaria de betão	
		Agregados correntes	Agregados leves
MX1	Qualquer	Qualquer	Qualquer
MX2.1	F0, F1 ou F2 / S1 ou S2	Qualquer	Qualquer
MX2.2	F0, F1 ou F2 / S1 ou S2	Qualquer	Qualquer
MX3.1	F0 ou F2 / S1 ou S2	Resistência ao gelo/degelo	Resistência ao gelo/degelo
MX3.2	F2 / S1 ou S2	Resistência ao gelo/degelo	Resistência ao gelo/degelo
MX4	Em cada caso estabelecer graus de exposição ao sal, à molhagem e ciclos de gelo/degelo e consultar o fabricante.		
MX5	Em cada caso o estabelecimento das especificações deve ser feito em função do ambiente e dos efeitos dos químicos envolvidos tendo em consideração as concentrações, quantidades e consultar o fabricante.		

É de salientar que os parâmetros F (F0, F1 ou F2) e S (S1 ou S2) constam da norma NP EN 771-1 [1], e estão relacionados respectivamente, com a resistência ao gelo/degelo e ao teor em sais solúveis activos. Estas exigências foram definidas anteriormente para unidades de alvenaria, encontrando-se expostas nos Quadros 2.8 e 2.9.

2.3.7. INSTALAÇÕES EMBEBIDAS

Os roços e cavidades não devem comprometer a estabilidade da parede, não devendo atravessar lintéis ou outros elementos estruturais construídos na parede e devendo ser alvo de um planeamento cuidadoso dos traçados, de modo a não se incorrer na deterioração total dos elementos e das juntas confinantes. São de evitar roços realizados de ambos os lados da alvenaria.

Os roços horizontais e inclinados devem ser evitados. No caso de ser necessário fazê-los, estes devem ser posicionados numa altura correspondente a 1/8 do pé-direito, imediatamente acima ou abaixo do pavimento. A profundidade dos roços em paredes estruturais deverá respeitar os valores presentes no EC6: Part 2 [24] e que se encontram definidos no Quadro 2.23. Mesmo em paredes não estruturais esses valores não devem ser ultrapassados. Os roços e as cavidades não devem ser permitidos se a sua profundidade for superior a metade da espessura do septo exterior da unidade de alvenaria.

Quadro 2.23 – Dimensões mínimas de roços horizontais e inclinados, conforme o EC6: Part 2 [24]

Espessura da parede (mm)	Profundidade máxima (mm)	
	Comprimento ilimitado	Comprimento ≤ 1250 mm
85 - 115	0	0
116 -175	0	15
176 - 225	10	20
226 - 300	15	25
Acima de 300	20	30

Os roços verticais que não se prolonguem por mais de um terço da distância entre pisos acima do nível do pavimento podem ter uma profundidade até 80 mm e uma largura até 120 mm, se a espessura da parede for igual ou superior a 225 mm. A largura total dos roços e das cavidades verticais não deve ser superior a 0,13 vezes o comprimento da parede.

A distância horizontal entre roços verticais contíguos ou entre um roço e uma cavidade ou uma abertura não deve ser inferior a 225 mm. A distância horizontal entre duas cavidades contínuas, quer estejam do mesmo lado da parede ou em lados opostos, ou entre uma cavidade e uma abertura não deve ser inferior ao dobro da largura da cavidade mais larga.

A distância horizontal entre a extremidade de um roço e uma abertura não deve ser inferior a 500 mm. Em paredes com espessura superior a 115 mm, a profundidade permitida dos roços pode ser aumentada de 10 mm se o roço for executado com precisão recorrendo a uma máquina. Se se utilizarem máquinas para executar os cortes, podem ser executados roços até 10 mm de profundidade em ambos os lados da parede com espessura não inferior a 225 mm.

A largura dos roços horizontais não deve ser superior a metade da espessura remanescente da parede.

No Quadro 2.24 apresentam-se as dimensões adequadas para os roços e cavidades verticais constantes no EC6: Part 2 [24].

Quadro 2.24 – Dimensões mínimas de roços e cavidades verticais, conforme o EC6: Part 2 [24]

Espessura da parede (mm)	Roços e cavidades executados após realização da alvenaria		Roços e cavidades executados durante a realização da alvenaria	
	Profundidade máxima (mm)	Largura máxima (mm)	Largura máxima (mm)	Espessura mínima remanescente da parede (mm)
85 -115	30	100	300	70
116 -175	30	125	300	90
176 - 225	30	150	300	140
226 - 300	30	175	300	175
Acima de 300	30	200	300	215

3

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS E ELEMENTOS DE ALVENARIA

3.1. GENERALIDADES

As alvenarias constituintes da envolvente dos edifícios devem satisfazer um conjunto de exigências, como foi definido no Capítulo 2, entre as quais o conforto térmico. As exigências sob este ponto de vista estão associadas a níveis de conforto e a pressupostos energéticos, estabelecidos nos diferentes países em função das condições climáticas locais e das soluções construtivas habituais.

Em Portugal, o regulamento que estabelece os requisitos do comportamento térmico é o RCCTE [21]. No caso da envolvente opaca dos edifícios, a quantificação é feita com base no coeficiente de transmissão térmica do elemento envolvente, U, que se encontram definidos no regulamento referido, em função do zonamento climático do país (ver Quadro 2.17 relativo às paredes).

As exigências de conforto estão associadas directamente às paredes, embora os elementos que constituem a mesma devam apresentar, sob o ponto de vista térmico características adequadas com as exigências aplicáveis às alvenarias. É de salientar que uma parede de alvenaria é constituída por elementos de alvenaria (tijolos cerâmicos, blocos de betão ou outros), argamassas de assentamento e reboco.

As características térmicas principais dos materiais e elementos de construção são a condutibilidade térmica, λ, e o coeficiente de transmissão térmica do elemento envolvente, U, respectivamente. Estas características podem ser determinadas por via experimental ou analítica [25].

A determinação das características térmicas dos produtos e elementos de construção por via analítica requer o conhecimento das características térmicas dos materiais utilizados na sua constituição. No caso de paredes de constituição homogénea, cujo elemento de alvenaria é maciço e idêntico à argamassa de assentamento, o valor da condutibilidade térmica do material é de fácil determinação. No entanto, no caso de paredes de constituição não homogénea, que corresponde a elementos para alvenaria incorporando alvéolos ou paredes compostas, a determinação da condutibilidade térmica do material não é tão simples.

A realização de ensaios sobre componentes completos ou em edifícios é dispendiosa e dirigida a situações particulares, pois enquanto as propriedades dos materiais são intrínsecas à natureza dos mesmos, as propriedades dos produtos são sempre função da forma e dimensões destes. Assim,

destaca-se a importância dos métodos analíticos, eventualmente com diferentes níveis de rigor, que possibilita a previsão das características térmicas do produto, antes da sua produção [25].

3.2. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

3.2.1. MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Para a determinação das características térmicas por via experimental existem métodos aplicáveis aos materiais e métodos aplicáveis aos produtos.

Assim, no caso dos materiais, os métodos normalizados que permitem determinar a condutibilidade térmica, λ, dos materiais constituintes dos produtos de alvenaria são:

- método da placa quente;
- método fluximétrico.

Ambos os métodos se aplicam a materiais homogéneos com formas e dimensões próprias, mas podem, mediante preparações diferentes, ser aplicados a materiais com forma própria e espessura mal definida. Os dois métodos consideram apenas a transmissão de calor por condução.

O primeiro método, conhecido como absoluto ou primário, não requer calibração através de provetes de condutibilidade térmica conhecida, ao contrário do que acontece com o segundo, que é designado por comparativo ou secundário.

No que se refere aos produtos, os métodos normalizados determinam o coeficiente de transmissão térmica, U, de produtos ou elementos de construção usados na envolvente dos edifícios, a partir do:

- método da câmara quente com guarda;
- método da câmara quente calibrada.

Estes métodos são aplicados a provetes ou componentes não homogéneos de grandes dimensões em regime estacionário às temperaturas típicas dos edifícios. Em ambos os métodos o provete é suportado e envolvido por uma estrutura perimetral e está colocado entre duas câmaras, uma quente e outra fria. As câmaras e a estrutura envolvente do provete devem ser convenientemente isoladas.

A dimensão do provete e as condições de ensaio devem ser estabelecidas em função das características do provete, tendo presente o efeito destes parâmetros nos resultados. Uma temperatura média de 10 ºC e um gradiente térmico de 20 ºC são correntes. A velocidade do ar nas duas câmaras é regulada em função dos objectivos do ensaio. É importante ter presente que a transferência de humidade durante o ensaio pode influenciar os resultados, para além de dificultar a uniformização da temperatura nas faces do provete. Após a determinação das temperaturas nas duas faces e nas superfícies do provete, e da potência fornecida à câmara quente, é possível calcular o coeficiente de transmissão térmica do provete.

Enquanto o primeiro método, conhecido como absoluto ou primário, não requer calibração através de provetes de material com características térmicas conhecidas, o segundo já requer essa calibração, sendo designado por comparativo ou secundário [25, 26].

As determinações experimentais das características térmicas dos produtos são efectuadas em condições convencionais de laboratório. Deste modo, é necessário proceder à correcção dos resultados obtidos em laboratório para que estes se aproximem dos das condições de serviço dos produtos ou elementos de construção. Estes valores são designados de valores de cálculo. As correcções necessárias, segundo a ISO/TR 9165 [27], devem ter em consideração os seguintes aspectos:

- humidade do material;
- envelhecimento, implicando a mudança das propriedades com o tempo;
- temperatura;
- massa volúmica;
- condições de execução.

O documento ISO/TR 9165 [27] define outras correcções necessárias, nomeadamente à condutibilidade térmica e ao coeficiente de transmissão térmica, respeitante aos betões (normais, leves e celulares) e às alvenarias, respectivamente.

No caso dos betões o desempenho térmico é expresso em termos de condutibilidade térmica, tendo que se ter em conta os seguintes aspectos:

- massa volúmica: maior factor que afecta a condutibilidade térmica. Em média esta decresce entre 0,1 a 0,2% por cada 1 kg/m^3 de aumento da massa volúmica;
- temperatura: acima de 0 ºC a variação situa-se entre 0,025% e 1% por cada grau, dependendo do teor de humidade; abaixo de 0 ºC a variação pode ser maior. Para uma gama de temperaturas de referência, entre 10 e 24 ºC, geralmente não é necessária qualquer correcção;
- humidade: o teor de humidade tem uma influência importante na condutibilidade térmica, que depende do tipo de betão, do tipo de inertes e da forma de produção, entre outros. O teor de humidade deve ser expresso em percentagem da massa, preferencialmente. No documento [27] é apresentada uma tabela que indica o crescimento da condutibilidade térmica, em percentagem, por cada 1% de crescimento do teor de humidade, em função da densidade do betão em questão. Por exemplo, o betão leve de argila expandida com uma massa volúmica entre 400 e 1800 kg/m^3 apresenta um crescimento linear de 4% da condutibilidade térmica, por cada 1% de crescimento do teor de humidade.

No que diz respeito às alvenarias, a resistência térmica depende da condutibilidade térmica do material constituinte do elemento, da geometria e da argamassa de assentamento. Para que as correcções possam ser aplicadas, é necessário que a densidade do elemento utilizado no ensaio não varie mais de ± 7% da sua densidade nominal. Os aspectos mais influentes são:

- massa volúmica aparente: a resistência térmica da alvenaria decresce com o aumento da massa volúmica aparente, entre 0,1 a 0,2% por cada aumento de 1 kg/m^3;
- temperatura: acima de 0 ºC a variação situa-se entre 0,025% e 1% por cada grau, dependendo do teor de humidade; abaixo de 0 ºC a variação pode ser maior. Para uma gama de temperaturas de referência, entre 10 e 24 ºC, geralmente não é necessária qualquer correcção;
- humidade: a influência da humidade é importante, mas variável com o clima (temperatura, pluviosidade), exposição da construção e tipo de elemento utilizado. Como primeira aproximação a relação é linear, com reduções da resistência térmica entre 3 a 10% por cada 1% em massa de acréscimo da humidade.

3.2.2. MÉTODOS NÃO EXPERIMENTAIS DE DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

3.2.2.1. Recurso a valores tabelados

Nos elementos homogéneos maciços, os valores tabelados estão associados à condutibilidade térmica do material constituinte, determinada por via experimental. Nos elementos de constituição heterogénea os valores tabelados resultam em geral do cálculo, dado não existir uma técnica de ensaio normalizada

para a determinação da resistência térmica dos elementos de alvenaria [9]. Os valores tabelados das características em análise são possíveis de estabelecer considerando os diferentes formatos e formas de assentamento.

Em Portugal o LNEC publicou alguns documentos que por recurso à via analítica, caracterizam termicamente os elementos para alvenaria e as soluções de parede mais correntes em Portugal, como é o caso da publicação ITE 50 – *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [28] que funciona como texto de apoio ao RCCTE [21]. Este documento faz referência aos seguintes aspectos:

- condutibilidade térmica dos materiais;
- resistências térmicas superficiais e de espaços de ar não-ventilados;
- resistências térmicas de diversas soluções de paredes e pavimentos;
- coeficientes de transmissão térmica de soluções mais correntes de elementos da envolvente dos edifícios, com destaque para as paredes, pavimentos, coberturas e envidraçados.

A norma NP EN 1745 [9] também apresenta um conjunto de tabelas em anexo que contém:

- a condutibilidade térmica dos materiais constituintes dos produtos de alvenaria, bem como das argamassas de assentamento. As tabelas contemplam diferentes massas volúmicas e dizem respeito a materiais secos, o que implica que esses valores têm de ser corrigidos em situações correntes;
- a resistência térmica de cálculo de paredes realizadas com diferentes elementos, em função da geometria do elemento, da condutibilidade térmica do material constituinte e da argamassa de assentamento. Esses valores foram calculados com base num programa de diferenças finitas tridimensionais.

3.2.2.2. Determinação por métodos analíticos

A determinação das características térmicas dos elementos e das alvenarias pode ser efectuada através de métodos simplificados ou de técnicas de cálculo numérico.

No caso dos métodos simplificados, em que se admite um regime estacionário, subdivide-se o elemento e a parede num conjunto de camadas cujos fluxos se calculam de forma independente, sendo associados no final. Esta abordagem baseia-se na norma EN ISO 6946 [29] que define como se deve proceder para efectuar o cálculo da condutibilidade térmica de elementos de construção. A norma refere ainda que os valores assim obtidos têm de ser corrigidos para ter em conta factores associados à execução.

Este método baseia-se na determinação da resistência térmica em regime permanente, devido a fluxos transversais à parede, sendo aplicável às diferentes camadas do elemento com propriedades térmicas uniformes, bem como a camadas de ar. É possível ainda aplicar o método a camadas não homogéneas.

Em alternativa pode-se utilizar as técnicas de cálculo numérico, recorrendo-se a métodos das diferenças finitas ou de elementos finitos a duas ou três dimensões. Neste tipo de cálculo tem de se ter atenção a existência ou não de isotropia na condutibilidade térmica dos materiais, assim como o tratamento dos alvéolos.

O método assenta fundamentalmente na metodologia descrita na norma NP EN 1745 [9], que estabelece os princípios para efectuar a determinação do coeficiente de transmissão térmica das alvenarias. Para se realizar a simulação deve-se introduzir alguma informação no programa, tal como:

- fluxo bi ou tridimensional;
- formatos rectangulares ou não rectangulares;
- condutibilidade térmica isotrópica ou não;
- considerar espaços de ar – alvéolos – admitindo parcelas de convecção e radiação;
- resistências térmicas superficiais.

Os dados devem ser fornecidos de forma a permitir a verificação noutros programas. Para se verificar a fiabilidade do programa devem ser utilizados casos de referência, apresentados na norma em questão, não sendo admissível um desvio superior a 2% para os coeficientes de transmissão térmica.

Os valores obtidos pelos métodos analíticos necessitam de correcções, apesar de se utilizarem valores de cálculo na determinação das características térmicas. Uma correcção definida pela norma EN ISO 6946 [29] está associada aos arredondamentos, em que admite como mais correcto arredondar à segunda casa decimal o valor final do coeficiente de transmissão térmica.

3.3. DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ALVÉOLOS DOS PRODUTOS DE ALVENARIA

3.3.1. ENQUADRAMENTO

As paredes de alvenaria são constituídas pelos elementos de alvenaria, pelas juntas de assentamento e pelos revestimentos.

A determinação das características térmicas das alvenarias requer o conhecimento de todas as características térmicas dos seus constituintes. Como todos os elementos utilizados em alvenaria apresentam alvéolos dispostos horizontal ou verticalmente, a determinação das suas características térmicas é fundamental, e estes assemelham-se em tudo ao funcionamento de câmaras de ar. É de referir que a correcta avaliação do isolamento térmico conferido pelos alvéolos é a principal dificuldade.

A resistência térmica de um alvéolo resulta do isolamento conferido pelo ar, coexistido fenómenos de condução, convecção e radiação, com predominância dos dois últimos.

3.3.2. CONDUÇÃO

A condução é um dos fenómenos de transferência de calor que ocorre quando existe um gradiente térmico num dado domínio, provocando a transferência de energia a nível molecular da região com temperatura mais elevada para a região com temperatura mais baixa. No caso presente dos alvéolos dos elementos de alvenaria, a transferência de energia por condução ocorre através do ar entre as superfícies do alvéolo a diferentes temperaturas. A transmissão por condução, normalmente é muito reduzida quando comparada com os fenómenos de convecção e radiação, devido à baixa condutibilidade térmica do ar.

O fenómeno de condução em alvéolos não apresenta qualquer diferença relativamente às situações correntes de condução [30]. Considerando uma situação simples de uma placa de espessura dx, com as outras dimensões suficientemente superiores para se poder considerar uma placa infinita, em termos práticos. A condução de calor é regida pela *Lei de Fourier*, segundo a qual a quantidade de calor que atravessa uma área A, normal à direcção do fluxo calorífico, por unidade de tempo, é proporcional ao gradiente térmico:

$$Q_x = -\lambda \; A \; \frac{\partial T}{\partial x} \qquad \text{ou} \qquad q_x = -\lambda \; \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.1}$$

em que:

T – temperatura (ºC);
λ – condutibilidade térmica do material (W/(m.ºC));
Q_x – fluxo segundo x (W);
q_x – densidade de fluxo segundo x (W/m^2).

Supondo que as superfícies da placa são mantidas a diferentes temperaturas T_1 e T_2, verifica-se experimentalmente que após um período de tempo a temperatura estabiliza no interior da placa, e que todos os pontos de cada plano paralelo às faces da placa apresentam a mesma temperatura, isto é, atingiu-se o regime estacionário, em que o perfil de temperaturas na espessura da placa é linear. Assim, o fluxo de calor por condução que atravessa a placa em regime estacionário é dado por:

$$q_x = \lambda \; \frac{T_1 - T_2}{\partial x} \tag{3.2}$$

em que:

T_1 e T_2 – temperatura superficial nas faces 1 e 2 da placa (ºC);
os restantes símbolos têm o significado referido em (3.9).

3.3.3. CONVECÇÃO

A convecção é uma forma de transferência de calor devido a um gradiente de temperatura, em que o calor é transmitido através do movimento macroscópico de um fluido. A convecção pode ser livre ou natural quando os movimentos no fluido são provocados pela diminuição de densidade ao ser aquecido. Na situação oposta, a convecção diz-se forçada, ou seja, o movimento no fluido é reforçado por um meio externo (ventilador mecânico, vento atmosférico, etc.).

É importante relacionar a convecção com o fluxo do fluido, onde a fig. 3.1 mostra a distribuição de temperaturas, podendo observar-se que a velocidade diminui na direcção da superfície, devido às forças de viscosidade que agem no fluido (convecção forçada). No caso da convecção natural, primeiro a velocidade aumenta com o aumento da distância a partir da placa e, depois, devido ao efeito da viscosidade, diminui rapidamente, conforme a fig. 3.2 [31]. Como a velocidade da camada de fluido adjacente à parede é zero, a transferência de calor entre a superfície e a camada de fluido adjacente deve ser efectuada por condução:

$$q_x = h_c (T_2 - T_e) \tag{3.3}$$

em que:

q_x – densidade de fluxo segundo x (W/m^2);
h_c – coeficiente de convecção térmica ou condutância superficial por convecção (W/(m^2.ºC));
T_2 – temperatura superficial (ºC);
T_e – temperatura do fluido (ºC).

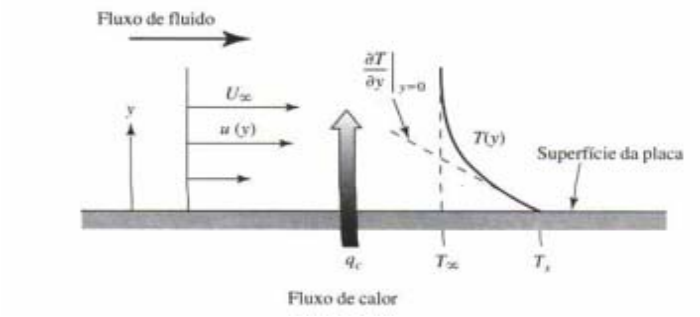


Fig. 3.1 – Distribuições de temperaturas e velocidades em escoamento laminar de convecção forçada sobre uma placa plana aquecida à temperatura T_s [31]

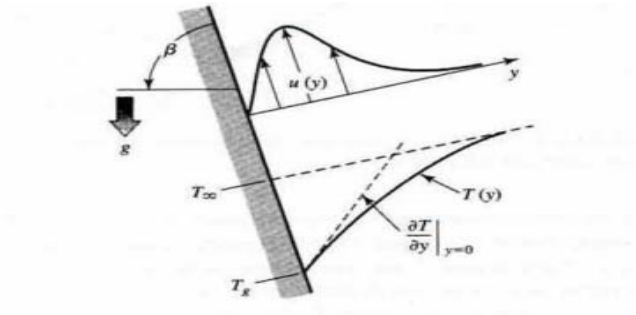


Fig. 3.2 – Distribuições de temperaturas e velocidades na convecção natural sobre uma placa plana aquecida inclinada por um ângulo β em relação à horizontal [31]

A expressão anterior é conhecida como *Lei do arrefecimento de Newton*. O coeficiente, h_c, é função de muitos parâmetros (forma e dimensão da superfície, tipo de fluido, gradientes de temperatura, etc.). O estudo do problema na sua forma mais geral é do domínio da Mecânica dos Fluidos e requer um estudo bastante aprofundado.

Para tal, convém examinar o fluxo do fluido com maior detalhe, onde a fig. 3.3 mostra a distribuição de velocidades em várias distâncias a partir do limite de uma placa. A partir desse ponto desenvolve-se uma região no fluxo, na qual as forças de viscosidade fazem com que o fluido diminua a velocidade. Essas forças dependem da tensão de corte τ [30, 31]. A velocidade do fluido paralelo à placa é utilizada para definir a tensão como:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{3.4}$$

em que:

τ – tensão de corte (N/m^2);
μ – viscosidade dinâmica (N.s/m^2);
$\partial x/\partial y$ – gradiente de velocidade (s^{-1}).

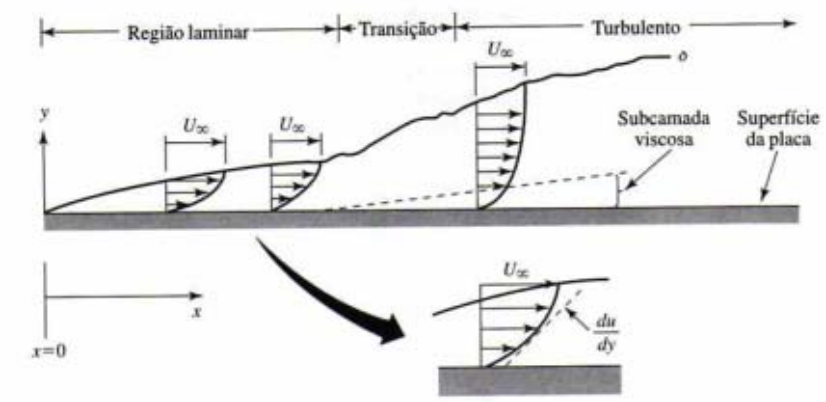


Fig. 3.3 – Perfis de velocidade nas camadas limite laminar, de transição e turbulenta no fluxo sobre uma placa plana [31]

A região de fluxo próxima à placa, onde a velocidade diminui em razão das forças de viscosidade é chamada camada limite. Após essa espessura o fluxo designa-se de livre, ou seja, sem perturbação ou regime de fluxo potencial.

Inicialmente o escoamento na camada limite é laminar, onde a sua espessura aumenta com a distância ao início da placa. Numa determinada distância crítica, x_c, os efeitos inerciais tornam-se grandes o suficiente, comparado com a acção de amortecimento viscoso, começando a aparecer pequenas perturbações no fluxo. À medida que essas perturbações aumentam, a regularidade do fluxo altera-se e ocorre a transição do escoamento laminar para o escoamento turbulento. O parâmetro adimensional que relaciona de forma quantitativa as forças de viscosidade e de inércia, e cujo valor determina a transição do escoamento laminar para o turbulento, é o número de Reynolds, *Re*, definido como:

$$\mathrm{Re} = \frac{vl}{\nu} = \frac{vl\rho}{\mu} \tag{3.5}$$

em que:

v – velocidade (m/s);
l – dimensão característica (m);
ρ – massa volúmica (kg/m^3);
ν – viscosidade cinemática (m^2/s);
μ – viscosidade dinâmica (N.s/m^2).

Como já foi referido o problema fundamental da convecção consiste na determinação do coeficiente de convecção, h_c, que é função sobretudo das propriedades dos fluidos e geometria do problema. Essas variáveis independentes são agrupamentos organizados de maneira a constituírem grupos adimensionais. Isto permite obter fórmulas gerais numa forma compacta, independentemente dos valores das variáveis. Essas grandezas chamam-se números [30]. A grandeza adimensional que expressa a transferência de calor por convecção é:

$$Nu = \frac{h_c l}{\lambda} \tag{3.6}$$

em que:

Nu – nº de Nusselt;
h_c - coeficiente de convecção térmica (W/(m^2.ºC));
l – dimensão característica (m);
λ – condutibilidade térmica (W/(m.ºC)).

Os outros grupos adimensionais utilizados mais correntemente no estudo das relações básicas da convecção são os números de Reynolds, apresentado na equação (3.5), Grashof, Eckert e Prandtl [31, 32].

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta T}{\nu^2} \tag{3.7}$$

$$Ec = \frac{v^2}{c_p \Delta T} \tag{3.8}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu\, c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \tag{3.9}$$

em que:

v – velocidade (m/s);
l – dimensão característica (m);
ν – viscosidade cinemática (m^2/s);
μ – viscosidade dinâmica (N.s/m^2);
g – aceleração da gravidade (m/s^2);
β –coeficiente de dilatação térmica (ºC^{-1});
c_p – calor específico a pressão constante (J/(kg.ºC));
ΔT – gradiente de temperatura (ºC).

No caso dos alvéolos dos elementos de alvenaria, o tipo de convecção que ocorre é a convecção natural ou livre, uma vez que o movimento das partículas se dá devido a variações do peso específico do fluido sem utilização de meios externos.

Em convecção livre as forças de inércia não existem e a dissipação viscosa é desprezável, pelo que o nº de Nusselt é dado pela seguinte expressão:

$$Nu = f(Gr, \mathrm{Pr}) \tag{3.10}$$

A convecção natural não se limita ao fluxo laminar, uma vez que se criam instabilidades pelo fluxo ascendente aquecido chocar com o fluido descendente arrefecido. Estes distúrbios podem ser amplificados podendo gerar turbulência. A transição entre regime laminar e turbulento depende da grandeza relativa das forças ascendentes e das forças resistentes viscosas, sendo corrente expressá-la em função do produto *Gr* por *Pr*, designado por nº de Raleigh, *Ra*.

3.3.4. RADIAÇÃO

É do conhecimento geral que a matéria emite energia térmica para o meio envolvente, mesmo que entre ela e o meio não exista qualquer veículo condutor.

O corpo negro é definido como um corpo ideal que recebe toda a energia incidente (não reflecte nenhuma parte) e internamente absorve toda a radiação (não transmite nenhuma parte). Um corpo negro absorve a máxima energia radiante e é utilizado na comparação com corpos reais.

Considere um corpo negro a temperatura uniforme colocado num recipiente fechado, onde se praticou vácuo, cujas paredes interiores também são negras a uma temperatura uniforme diferente do corpo negro colocado no recipiente. Uma vez que o corpo considerado negro vai absorver toda a energia nele incidente e quando se atingirem as condições de equilíbrio térmico, a sua temperatura manter-se-á constante, considera-se que o corpo emite a mesma quantidade de energia que recebe. Assim, pode-se concluir que o corpo negro é também um emissor perfeito no sentido em que emite o máximo de radiação térmica, independentemente do comprimento de onda e direcção [33].

A energia térmica não se distribui uniformemente por todos os comprimentos de onda, o que implica a necessidade de definir o poder emissivo monocromático, E_λ, como sendo a energia radiada por unidade de tempo e por unidade de área no intervalo d_λ:

$$dE = E_\lambda d\lambda \qquad E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \tag{3.11}$$

A *Lei de Planck* define a distribuição espectral do poder emissivo monocromático para um corpo negro [30]

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{(C_2/\lambda T)} - 1)} \tag{3.12}$$

em que:

$E_{b\lambda}$ – poder emissivo monocromático de um corpo negro (W/m^2);
λ – comprimento de onda (μm);
C_1=3,7413 x 10^8 (W.μm^4)/m^2;
C_2 =1,4388 x 10^4 μm.K.

Representando a distribuição espectral do poder emissivo monocromático em função do comprimento de onda, constata-se que o comprimento de onda, no qual o poder emissivo monocromático atinge o seu máximo, diminui com o aumento da temperatura. O relacionamento entre o comprimento de onda máximo, λ_{max}, no qual o poder emissivo monocromático atinge o seu valor máximo é chamado de *Lei de Wien* [31]:

$$\lambda_{\max} T = C_3 = 2897{,}8 \ \mu\text{m.K} \tag{3.13}$$

O poder emissivo de um corpo negro, E_b, é a quantidade de radiação térmica emitida pelo corpo por unidade de tempo e por unidade de área. Para uma certa temperatura absoluta a área sob a curva de distribuição de *Planck* corresponde ao poder emissivo, *Lei de Stefan-Boltzmann*:

$$\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = E_b = \sigma T^4 \tag{3.14}$$

em que:

$E_{b\lambda}$ – poder emissivo monocromático de um corpo negro (W/m^2);

E_b – poder emissivo de um corpo negro (W/m^2);

σ – constante de Stefan-Boltzmann, constante de proporcionalidade independente do material, σ=5,6697 x 10^{-8} W/(m^2.K^4);

T – temperatura absoluta (K).

Os fenómenos de radiação são essencialmente superficiais, pelo que ao incidir sobre uma superfície a radiação pode decompor-se em parcelas absorvidas, reflectidas e transmitidas. Designando-se por α, ρ e ζ respectivamente as parcelas absorvidas, reflectidas e transmitidas teremos:

$$\alpha + \rho + \zeta = 1 \tag{3.15}$$

É importante salientar que para corpos negros α=1 e corpos transparentes ζ=1. Os corpos são designados de reflectores perfeitos quando ρ=1, podendo a reflexão ser especular (ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência), ou difusa (reflexão em todas as direcções). Quando um corpo não negro é colocado, na situação hipotética já referida no início deste ponto, no interior de um recipiente cujas paredes se comportam como um corpo negro, para que o conjunto esteja em equilíbrio térmico é necessário que o corpo emita a mesma energia que absorve – *Lei de Khirchhoff*:

$$\alpha = \varepsilon \tag{3.16}$$

em que ε é a emissividade de uma superfície e corresponde à relação entre o poder emissivo de um corpo real e o poder emissivo de um corpo negro à mesma temperatura.

A *Lei de Khirchhoff* só é válida se os corpos emissores forem negros e estiverem à mesma temperatura que o corpo em estudo, o que na realidade não é totalmente correcto, uma vez que os corpos negros não existem. Nas condições correntes é usual admitir-se que α e ε são independentes da direcção da radiação, admitindo-se portanto que os corpos são absorsores e emissores difusos, bem como que α é independente do comprimento de onda da radiação incidente, designando-se os corpos por *corpos cinzentos* [30].

Nos corpos vulgares o poder emissivo vem reduzido, ficando a equação de *Stefan-Boltzmann* da seguinte forma:

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \tag{3.17}$$

em que:

ε – emissividade de um corpo.

Para as aplicações em Térmica dos Edifícios é importante definir as trocas de energia por radiação entre superfícies. Deste modo, convém distinguir os seguintes termos:

- poder emissivo, *E,* representa a energia total emitida em todas as direcções por unidade de área da superfície do corpo emissor e por unidade de tempo;
- intensidade de radiação emitida *I'*, representa a radiação que passa por um plano imaginário normal à direcção da emissão e que está contido dentro de um ângulo sólido, por unidade de tempo;
- fluxo de radiação *Q*, representa a energia radiada por um corpo que é interceptado por outro corpo por unidade de tempo [30].

Estas três grandezas estão obviamente relacionadas, uma vez que o poder emissivo de um elemento de superfície dA_1 é igual ao fluxo de dA_1 para A_2, por unidade de área de dA_1 quando A_2 é tal que intercepta toda a radiação emitida por dA_1. De acordo com a fig. 3.4, A_2 é uma superfície hemisférica centrada em dA_1, obtendo-se a seguinte expressão:

$$\frac{\iint dQ_{1\to 2}}{dA_1} = E_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_1' \cos\theta \; sen\theta \; d\theta \; d\varphi = I_1'\pi \tag{3.18}$$

em que:

$dQ_{1\to 2}$ – fluxo de radiação que representa a energia radiada pelo corpo dA_1 que é interceptada por dA_2, por unidade de tempo;

I_1' – intensidade de radiação emitida pela superfície dA_1 (W/m^2)

π – ângulo sólido.

Esta igualdade acontece porque se trata apenas da energia emitida que deixa a superfície, passando a densidade de fluxo a ser representada pelo poder emissivo hemisférico, *E*.

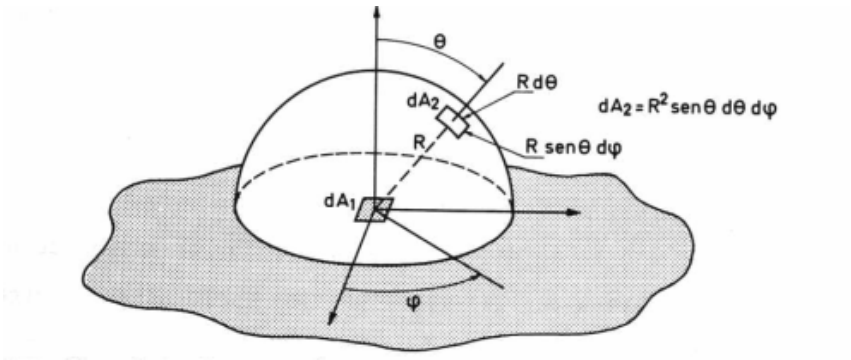


Fig. 3.4 – Relações geométricas para a determinação do poder emissivo de um elemento de superfície dA_1 [30]

Se considerarmos o problema da determinação do fluxo de radiação entre dois corpos cujas superfícies são A_1 e A2, se a emissão for difusa obtém-se:

$$dQ_{1\to 2} = \frac{E_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi \; r^2} dA_2 dA_1 \tag{3.19}$$

Exprimindo a potência radiada por A_1 que atinge A_2 por unidade de área de A_1 tem-se:

$$\frac{dQ_{1\to 2}}{A_1} = E_1\left[\frac{1}{A_1}\int_{A1}\int_{A2}\frac{\cos\theta_1\cos\theta_2}{\pi\ r^2}dA_2 dA_1\right] \tag{3.20}$$

Assim, a fracção da potência total radiada que atinge A_2 é dada pelo termo entre parêntesis designado factor de forma, F_{12}. O factor de forma é uma grandeza que apenas é função da geometria do problema e que varia entre 0 e 1. Os factores de forma gozam de algumas propriedades facilmente determináveis:

- reciprocidade: $A_1F_{12}=A_2F_{21}$
- se as superfícies A_j formarem um conjunto fechado, no sentido de qualquer das superfícies só ter linha de vista com outras superfícies do conjunto, tem-se:

  $\sum_{j=1}^{n} F_{kj} = 1$, para uma qualquer superfície k do conjunto.

A determinação de um factor de forma a partir da definição é bastante trabalhosa, recorrendo-se frequentemente a tabelas onde se apresentam os factores de forma mais correntes.

No caso dos corpos não negros, os fluxos totais são constituídos por parcelas emitidas e parcelas reflectidas que também devem ser consideradas. Para tal é necessário definir:

- radiosidade – J – potência total que provém da superfície por unidade de área. Inclui uma parcela relativa à energia emitida e outra à reflectida;
- irradiação – G – potência total que incide numa superfície por unidade de área.

Para um dado corpo:

$$J = E + \rho\ G \tag{3.21}$$

3.3.5. TRATAMENTO CONJUNTO DOS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR EM ALVÉOLOS

Nos alvéolos ocorrem fenómenos de transmissão de calor por condução, convecção e radiação, como já foi referido. Normalmente, para as emissividades habituais dos materiais de construção, a parcela mais importante da transmissão é devida à radiação.

Em Térmica dos Edifícios é comum procurar associar os diversos fenómenos, que apesar de terem sido tratados em separado ocorrem em simultâneo. Num espaço preenchido por ar entre duas superfícies à temperatura T_1 e T_2 com $T_1>T_2$, a densidade de fluxo de calor por convecção e marginalmente por condução da superfície do corpo 1 para o ar é:

$$q_c = h_c(T_1 - T_2) \tag{3.22}$$

Por sua vez, a densidade de fluxo radiado pela superfície 1 pode ser expressa como:

$$q_r = \sigma\ S(T_1^4 - T_2^4) \tag{3.23}$$

em que S é função das características geométricas e físicas das superfícies. Esta expressão pode ser representada da seguinte forma:

$$q_r = h_r (T_1 - T_2) \tag{3.24}$$

A densidade de fluxo de calor total por condução, convecção e radiação pela superfície 1 resulta da expressão seguinte:

$$q = (h_c + h_r)(T_1 - T_2) \tag{3.25}$$

Em Térmica dos Edifícios designa-se o factor, h_c+h_r por condutância térmica de espaços de ar e o seu inverso $R=1/(h_c+h_r)$ por resistência térmica de espaços de ar.

4

REVESTIMENTOS DE PARAMENTOS EXTERIORES DE EDIFÍCIOS

4.1. GENERALIDADES

O conjunto tosco da parede/revestimento, actua em complementaridade para o desempenho das funções inerentes às partes opacas das paredes. As exigências dos revestimentos são indissociáveis das exigências funcionais das paredes. Contudo, enquanto que algumas das exigências são comuns ao conjunto, outras dizem respeito essencialmente à alvenaria e outras aos revestimentos.

O tipo de construção portuguesa privilegia a qualidade dos revestimentos de paredes, uma vez que têm uma influência significativa nas condições de habitabilidade dos edifícios e por isso é fundamental estudar a solução de parede como um todo e verificar as características do revestimento.

Os revestimentos exteriores têm várias funções, tais como: possibilitar uma adequada estanquidade à água da chuva, influenciar o isolamento térmico, influenciar a existência de condensações no interior, proteger as alvenarias e estruturas exercendo um papel determinante na durabilidade, e condicionar o aspecto estético dos edifícios, sendo por isso um factor de grande importância no aspecto das cidades e na qualidade de vida da população.

Por outro lado, os revestimentos interiores garantem a regularidade e o aspecto estético desses espaços, condicionam o conforto higrotérmico, influenciam a acústica e podem ter um papel importante no conforto térmico.

É fundamental que as características dos revestimentos das paredes exteriores sejam impostas por condições ou exigências quantitativas e/ou qualitativas e não por meras indicações de execução ou aplicação em obra dos produtos.

Os revestimentos de paredes exteriores mais utilizados em Portugal são os rebocos tradicionais de ligantes hidráulicos, rebocos não tradicionais de ligantes hidráulicos, revestimentos de pedra natural, sistemas de isolamento térmico por revestimentos delgado sobre isolante e revestimentos por elementos descontínuos com função de acabamento.

É de salientar que há algumas décadas estas funções eram cumpridas, em muito devido a uma mão-de-obra especializada, que praticava a arte de bem construir. Pelo contrário, a construção de hoje em dia já não as cumpre, pois a construção absorve uma mão-de-obra indiferenciada, frequentemente mal preparada e muitas vezes desconhecedora da nossa tradição construtiva, pelo facto de incorporar muitos trabalhadores estrangeiros.

Esta não é a única razão que deve levar os técnicos a definir com maior rigor os requisitos a estabelecer para os revestimentos. No mercado existem novos materiais e tecnologias para paredes e

revestimentos, que exigem um maior conhecimento específico para serem convenientemente utilizados e cumprirem o efeito desejado.

4.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS DOS REVESTIMENTOS DE PAREDES EXTERIORES

4.2.1. CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL

Aos revestimentos deve ser aplicada uma filosofia exigencial, sendo mais adaptável a situações inovadoras, que implica três passos distintos:

- definir as funções que se pretende ver desempenhadas pelo revestimento;
- identificar as características do revestimento relevantes para o desempenho das funções pretendidas;
- estabelecer métodos de quantificação e de avaliação dessas características.

Os revestimentos podem ser classificados de diversas formas em função do material, espessura ou grau de tradicionalidade. No entanto, para facilitar a utilização da filosofia exigencial é corrente classificá-los de acordo com as funções principais que desempenham.

Deste modo, as principais funções dos revestimentos de paredes são a regularização dos toscos, o acabamento dos paramentos e a protecção das alvenarias, constituindo uma barreira às acções externas. Outros revestimentos mais específicos podem ter funções de isolamento térmico ou acústico.

Os revestimentos exteriores têm de desempenhar funções de impermeabilização, ou seja, têm de contribuir significativamente para a estanquidade global da parede. A classificação funcional adoptada pelo LNEC para revestimentos exteriores centra-se essencialmente nesta função e admite três níveis, aos quais foi acrescentado um quarto relacionado com a função de isolamento térmico:

- estanquidade – conseguem, por si sós, garantir a estanquidade da parede à água da chuva. Em teoria mesmo que a parede esteja fendilhada, o revestimento consegue evitar a entrada de água para o interior;
- impermeabilização – contribuem para o tosco da parede, mas não asseguram, só por si, a estanquidade. Se a parede não tiver uma boa condição de estanquidade ou se estiver fendilhada, o revestimento não chega para evitar a entrada de água;
- isolamento térmico – têm como função principal, não a estanquidade à água, mas sim o isolamento térmico. No que se refere à capacidade de protecção contra a água da chuva são, em geral, de estanquidade (por exemplo, o sistema ETICS) ou de impermeabilização;
- acabamento – têm como função o acabamento das paredes, sendo mínima a contribuição para a estanquidade à água. Os revestimentos de acabamento são muitas vezes resistentes à água, ou seja, são laváveis, mas não são impermeáveis, o que significa que não impermeabilizam as paredes.

Os revestimentos interiores são classificados de acordo com a capacidade que possuem em desempenhar as funções exigidas no interior, como a regularização das paredes, a resistência à água e decoração [34].

4.2.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

A Directiva Produtos de Construção estabelece seis exigências essenciais para os produtos, materiais e sistemas a utilizar na construção de edifícios:

- estabilidade (EE1);
- segurança contra riscos de incêndio (EE2);
- higiene, saúde e ambiente (EE3);
- segurança no uso (EE4);
- protecção contra o ruído (EE5);
- economia de energia (EE6).

Estas exigências essenciais são aplicáveis às paredes no seu conjunto, mas os revestimentos têm que dar o contributo necessário em cada caso. Deste modo, os revestimentos de paredes têm que verificar determinados requisitos para que a parede onde se encontram inseridos possa cumprir as exigências essenciais.

A estabilidade é um problema que muitas vezes se coloca aos revestimentos, pois no caso corrente de um edifício de 10 andares constituído por um revestimento de fachada em placas de granito, imediatamente se percebe a importância de garantir que nenhuma pedra se destaque da fachada e caia em zonas frequentadas por pessoas. Com base nisto, verifica-se que a estabilidade tem de ser considerada, ou seja, o sistema de fixação tem de ser calculado e ensaiado de forma a que se possa garantir uma estabilidade adequada.

No caso de um revestimento de impermeabilização de ligante sintético, do tipo membrana elástica, não faz sentido avaliar a sua estabilidade, mas por outro lado as exigências de higiene, saúde e ambiente e de segurança contra riscos de incêndio devem ser consideradas com particular atenção.

Estes são dois exemplos de como os revestimentos exteriores têm de cumprir determinados requisitos para que a parede no seu conjunto possa cumprir as exigências essenciais.

4.3. EXIGÊNCIAS DAS ARGAMASSAS DE ALVENARIA E DE REBOCO

4.3.1. ENQUADRAMENTO

Em Portugal as argamassas são utilizadas frequentemente como revestimento exterior das paredes de alvenaria, pelo que de seguida se definem as exigências normativas das argamassas.

A argamassa de alvenaria ou a argamassa de reboco para uso externo ou interno, pronta, semi-acabada, ou feita em obra, resulta da mistura de ligantes inorgânicos, agregados, água, com ou sem aditivos e adjuvantes.

A argamassa de alvenaria tem uma influência significativa no comportamento da parede, tendo que se atender ao seu grau de exposição, para uma escolha correcta da argamassa.

As argamassas podem ser classificadas quanto: à concepção (argamassa de comportamento especificado e argamassa de composição prescrita); às propriedades e utilização (argamassa corrente, argamassa-cola para juntas delgadas e argamassa leve); e ao tipo de utilização (argamassa pronta, argamassa de constituintes pré-misturadas e argamassa feita em obra).

As exigências relativas às argamassas que devem ser tidas em atenção, e que se encontram especificadas na normalização em vigor [35, 36], são:

- proporção de constituintes;
- tempo em aberto;
- teor de cloretos;
- teor de ar;
- resistência à compressão;

- resistência do conjunto;
- absorção de água;
- permeabilidade ao vapor de água;
- densidade;
- condutibilidade térmica;
- durabilidade;
- reacção ao fogo.

De seguida apresenta-se a quantificação dessas exigências e a forma de avaliação do desempenho, recorrendo-se a vária normalização existente.

4.3.2. PROPORÇÃO DOS CONSTITUINTES

Os requisitos e propriedades das argamassas frescas e endurecidas especificadas nas normas EN 998-1 [35] e EN 998-2 [36] devem ser definidos com base nos métodos de ensaio e procedimentos aí referidos. Para esses ensaios, as amostras de argamassa devem ser recolhidas de acordo com a EN 1015-2 [37].

Nas argamassas de alvenaria de composição prescrita, as proporções de constituintes devem ser declaradas pelo fabricante, em peso ou em volume. Adicionalmente, a resistência à compressão deve ser declarada através de referências que estabeleçam a relação entre a resistência à compressão e as proporções da mistura.

4.3.3. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA DE ALVENARIA FRESCA

4.3.3.1. Tempo em aberto

Nas argamassas de alvenaria e de reboco prontas e semi-acabadas deve ser declarado o tempo em aberto. Quando recolhida uma amostra de acordo com a EN 1015-2 [37], e ensaiada em conformidade com a EN 1015-9 [38], o tempo em aberto não deve ser inferior ao valor declarado.

O tempo em aberto significa o tempo em que uma argamassa pode ficar estendida sobre a base até a colocação da unidade de alvenaria, sem que haja perda da sua propriedade adesiva. Este tempo em aberto tem como finalidade permitir que os aditivos presentes se tornem activos e prontos a conferir propriedades fundamentais, tais como retenção de água e plasticidade.

4.3.3.2. Teor de cloretos

Caso seja relevante para a utilização, o fabricante deve declarar (em %, em termos de fracção da massa) o teor de cloretos presentes na argamassa de alvenaria, tal como esta é fornecida. Quando recolhida uma amostra de acordo com a EN 1015-2 [37], e ensaiando-a em conformidade com a EN 1015-17 [39], através do procedimento de determinação do teor de cloretos solúveis em água ou através de cálculo baseado na medição do teor de iões de cloro nos constituintes da argamassa, o valor de cloretos não deve ser superior ao valor declarado.

O teor de cloretos não deve ser superior a 0,1% da massa seca da argamassa.

4.3.3.3. Teor de ar

O teor de ar deve ser declarado pelo fabricante, sempre que tal especificação seja relevante para a utilização, indicando a gama de valores na qual se encontrará o teor da argamassa de alvenaria e de reboco. Quando a amostra é recolhida em conformidade com a EN 1015-2 [37], e ensaiada de acordo com a EN 1015-7 [40], o teor de ar deverá encontrar-se dentro da gama de valores declarados.

No caso da argamassa constituída por agregados porosos, o teor de ar pode ser alternativamente determinado mediante o ensaio da argamassa fresca conforme a EN 1015-6 [41].

4.3.4. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA ENDURECIDA

4.3.4.1. Classificação da argamassa endurecida

Em função do tipo de uso e das condições de exposição são requeridas argamassas de reboco com diferentes propriedades e níveis de desempenho. No Quadro 4.1 apresentam-se as classificações a atribuir às argamassas de reboco relativamente à resistência à compressão, absorção de água e condutibilidade térmica. Nas argamassas de reboco são apresentadas os seguintes tipos:

- GP: argamassa de reboco de uso geral;
- LW: argamassa de reboco leve;
- CR: argamassa de reboco colorida;
- OC: argamassa de reboco monocamada;
- R: argamassa de renovação;
- T: argamassa de isolamento térmico.

Quadro 4.1 – Classificação das propriedades da argamassa endurecida, conforme a EN 998-1 [35]

Propriedades	Categorias	Valores
Intervalo para a resistência à compressão ao fim de 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 MPa
	CS II	1,5 a 5,0 MPa
	CS III	3,5 a 7,5 MPa
	CS IV	≥ 6 MPa
Absorção de água	W 0	Não especificado
	W 1	$c \leq 0{,}40$ kg/(m^2.min^{0,5})
	W 2	$c \leq 0{,}20$ kg/(m^2.min^{0,5})
Condutibilidade térmica	T 1	≤ 0,1 W/(m.K)
	T 2	≤ 0,2 W/(m.K)

De seguida são apresentadas as propriedades das argamassas endurecidas, tanto de alvenaria como de reboco, que devem ser declaradas em função do uso pretendido.

4.3.4.2. Resistência à compressão

Nas argamassas de alvenaria de comportamento especificado, o fabricante deve declarar a resistência à compressão da argamassa. Esta declaração pode ser realizada de acordo com o Quadro 4.2, no caso da

argamassa de alvenaria, onde a resistência é designada pela letra M seguida da classe da resistência à compressão correspondente à argamassa (em MPa).

Quadro 4.2 – Classes da argamassa de alvenaria, segundo a EN 998-2 [36]

Classe	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistência à compressão (MPa)	1	2,5	5	10	15	20	*d*
d é uma resistência à compressão superior a 25 MPa e declarada pelo fabricante.							

A resistência à compressão deve ser ensaiada conforme a EN 1015-11 [42], não devendo ser inferior ao valor declarado da resistência à compressão ou à classe de resistência à compressão declarada. Deve ainda ser declarado se o teor de cal e ar, calculado como hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), é igual ou superior a 50% da massa total de ligante.

No caso das argamassas de reboco, em função do tipo de argamassa devem ser respeitadas as categorias apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Requisitos para as argamassas de reboco, segundo a EN 998-1 [35]

Tipo de argamassa	GP	LW	CR	OC	R	T
Resistência à compressão (categorias)	CS I até CS IV	CS I até CS III	CS I até CS IV	CS I até CS IV	CS II	CS I até CS II

4.3.4.3. Resistência do conjunto

Nas argamassas de alvenaria de comportamento especificado, com utilização prevista em elementos sujeitos a exigências estruturais, a resistência do conjunto, resultante da combinação da argamassa com as unidades de alvenaria, deve ser declarada em termos de resistência característica inicial ao corte. Esta declaração pode ser efectuada com base em dois métodos:

- declaração com base em ensaios, em que a resistência característica inicial ao corte da argamassa combinada com uma determinada unidade de alvenaria, deve assentar em ensaios realizados sobre uma amostra de argamassa conforme a EN 1015-2 [37] e testada de acordo com a EN 1052-3 [15]. A resistência característica inicial ao corte não deve ser inferior ao valor declarado;
- declaração com base nos valores tabelados, em que caso não se recorra ao método citado na alínea anterior, a resistência característica inicial ao corte da argamassa combinada com as unidades de alvenaria deverá atender ao Anexo C da EN 998-2 [36] e apresenta os seguintes valores:
    - 0,15 MPa para argamassas correntes e argamassas leves;
    - 0,30 MPa para argamassas-cola para juntas delgadas.

4.3.4.4. Absorção de água

O fabricante deve declarar o valor da absorção à água das argamassas de alvenaria e de reboco destinadas a utilização em elementos exteriores e expostos directamente aos agentes climatéricos. A argamassa deve ser ensaiada em conformidade com a EN 1015-18 [43], não devendo a absorção à água ser superior ao valor declarado.

No caso das argamassas de reboco, em função do tipo de argamassa devem ser respeitadas as categorias apresentadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Requisitos para as argamassas de reboco em função da absorção à água, segundo a EN 998-1 [35]

Tipo de argamassa	GP	LW	CR	OC	R	T
Absorção à água (categorias)	W 0 até W 2	W 0 até W 2	W 0 até W 2	W 1 até W 2	≥ 0,3 kg/m^3 após 24	W 1

4.3.4.5. Permeabilidade ao vapor de água

Nas argamassas de alvenaria destinadas a utilizar em elementos exteriores, o fabricante deve declarar o valor da permeabilidade ao vapor de água, em referência com a tabela A.12 da NP EN 1745 [9], que fornece valores tabelados do coeficiente de difusão ao vapor de água da argamassa.

No caso das argamassas de reboco destinadas a utilizar no exterior, o fabricante deve declarar o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água. A argamassa deve ser ensaiada de acordo com a NP EN 1015-19 [44], não devendo o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água ser superior ao valor declarado, com excepção das argamassas de renovação e de isolamento térmico que devem ter um valor igual ou inferior a 15.

4.3.4.6. Permeabilidade à água após ciclos climatéricos

O fabricante deve declarar o valor da permeabilidade à água após ciclos climatéricos para argamassas de reboco monocamada. Esta deve ser ensaiada em conformidade com a EN 1015-21 [45], onde o respectivo valor deve ser igual ou inferior a 1 ml/cm^2 após 48 horas.

4.3.4.7. Densidade

Nas argamassas de alvenaria e de reboco, secas e endurecidas, o fabricante deve declarar a gama de valores em que se encontrará a sua densidade. Essas argamassas devem ser ensaiadas em conformidade com a EN 1015-10 [46], em que a respectiva densidade deve encontrar-se dentro da gama de valores referida.

Nas argamassas leves, a densidade deve ser igual ou inferior a 1300 kg/m^3.

4.3.4.8. Condutibilidade térmica

Nas argamassas de alvenaria e de reboco com utilização prevista em elementos sujeitos a exigências térmicas, o fabricante deve fornecer indicação sobre os valores de concepção da condutibilidade térmica (em W/(m.K)), com referência à tabela A.12 da NP EN 1745 [9]. No caso das argamassas leves, os valores da condutibilidade térmica devem ser declarados com base no ponto 4.2.2 da NP EN 1745 [9]. O fabricante deve ainda declarar a base/método da sua declaração.

No caso da amostra de argamassa de alvenaria ser ensaiada de acordo com a NP EN 1745 [9], a condutibilidade térmica não deve ser inferior ao valor declarado.

4.3.4.9. Aderência

Nas argamassas de reboco, o fabricante deve indicar o valor da aderência entre a argamassa e as unidades de alvenaria, assim como o valor da rotura ideal da argamassa. O ensaio deve ser realizado com base na EN 1015-12 [47], e o resultado deve ser igual ou superior ao valor declarado e à rotura ideal. No caso da argamassa de reboco monocamada, o ensaio deve ser efectuado em conformidade com a EN 1015-21 [45], em que se analisa a aderência após ciclos climatéricos, devendo o resultado respeitar a condição referida para as restantes argamassas.

4.3.4.10. Reacção ao fogo

O fabricante deve declarar a classificação das argamassas de alvenaria e de reboco quanto à sua reacção ao fogo.

As argamassas que possuam uma massa ou volume de materiais orgânicos distribuídos de forma homogénea inferior a 1%, são classificadas com a classe A1 de reacção ao fogo, sem necessidade de ensaios. No caso de argamassas que contenham mais de 1% da massa acima referida devem ser classificadas segundo a EN 13501-1 [14], declarando a apropriada classe de reacção ao fogo.

4.3.4.11. Durabilidade

As argamassas de alvenaria e de reboco devem ser analisadas de modo a avaliar se são ou não resistentes ao gelo/degelo, em função do local de aplicação da argamassa, com excepção da argamassa de reboco monocamada. Neste caso, a durabilidade ao gelo/degelo é estabelecida por ensaios de aderência e de permeabilidade à água após ciclos climatéricos.

A argamassa deve possuir durabilidade suficiente de forma a resistir às condições de exposição locais, para o período previsto da construção, não devendo possuir constituintes que possam ter um efeito prejudicial nas propriedades ou na durabilidade da argamassa ou dos materiais na sua proximidade.

Com base na normalização europeia em vigor, mais concretamente o EC6: Part 2 [24], é possível definir as especificações mínimas para as argamassas em função da classe de exposição, apresentadas no Capítulo 2 no ponto 2.3.6. No Quadro 4.5 utilizam-se as abreviaturas apresentadas abaixo para as argamassas e cuja definição se encontra na EN 998-2 [36]:

- P – argamassa para utilização em alvenaria sujeita a uma exposição passiva, e que se aplica a alvenarias ou elementos de alvenaria que não estão expostos à humidade ou condições de gelo;
- M – argamassa para utilização em alvenaria sujeita a uma exposição moderada, e que se aplica a alvenarias ou elementos de alvenaria que estão expostos à humidade e a ciclos de gelo/degelo, excluindo construções sujeitas a exposições severas;
- S – argamassa para utilização em alvenaria sujeita a uma exposição severa, e que se aplica a alvenarias ou elementos de alvenaria sujeitos à saturação com água combinado com frequentes ciclos de gelo/degelo devido às condições climáticas e ausência de protecções.

Adicionalmente, para seleccionar a argamassa com uma durabilidade adequada outras características devem ser tidas em consideração como a resistência à compressão, a resistência do conjunto e absorção de água, de modo a verificar se a argamassa escolhida é compatível com as unidades de alvenaria escolhidas e também se alvenaria satisfaz todos os requisitos exigidos.

Quadro 4.5 – Especificações mínimas para as argamassas em função das classes de exposição, conforme o EC6: Part 2 [24]

Classes de exposição	Combinação de argamassa com qualquer tipo de blocos
MX1	P, M ou S
MX2.1	M ou S
MX2.2	M ou S
MX3.1	M ou S
MX3.2	S
MX4	Em cada caso estabelecer graus de exposição ao sal, à molhagem e ciclos de gelo/degelo. Consultar o fabricante.
MX5	Em cada caso o estabelecimento das especificações deve ser feito em função do ambiente e dos efeitos dos químicos envolvidos tendo em consideração as concentrações e quantidades. Consultar o fabricante.

4.3.5. PROPRIEDADES ADICIONAIS DA ARGAMASSA-COLA DE ALVENARIA PARA JUNTAS DELGADAS

4.3.5.1. Dimensão do agregado

Os agregados não devem apresentar uma dimensão superior a 2 mm. Quando a amostra é recolhida em conformidade com a EN 1015-2 [37] e ensaiada de acordo com a EN 1015-1 [48], o fabricante deve declarar a dimensão máxima do agregado.

4.3.5.2. Tempo de correcção

O fabricante deve declarar o tempo de correcção. Quando a amostra é recolhida de acordo com a EN 1015-2 [37] e ensaiada com base na EN 1015-9 [38], o tempo de correcção deve ser superior ao valor declarado.

O tempo de correcção é o tempo durante a qual a posição das unidades, na camada de argamassa fresca, podem ser alteradas sem perda significativa da força adesiva.

4.4. REBOCOS TRADICIONAIS DE LIGANTES HIDRÁULICOS

4.4.1. DEFINIÇÃO DOS REBOCOS TRADICIONAIS

Os rebocos tradicionais são revestimentos executados a partir de argamassas constituídas por um ou mais ligantes minerais, areia e água, eventualmente acrescidos por adjuvantes de vários tipos. Estas argamassas são doseadas e fabricadas em obra, usando-se vulgarmente as areias da própria região onde se situa a obra. Estes revestimentos são classificados como de impermeabilização devido ao tipo de protecção que oferecem ao suporte.

Estes rebocos ao exigirem, quer no seu fabrico quer na sua aplicação mão-de-obra especializada, têm nos últimos anos provocados alguns dissabores, pelo facto de existir no sector uma falta de mão-de-obra qualificada.

Apesar dos problemas resultantes da aplicação deste tipo de revestimento e da falta de especificações nacionais de carácter normativo acerca da sua execução e aplicação, estes revestimentos continuam a ser os mais utilizados nas fachadas dos edifícios em Portugal [34, 49].

4.4.2. CAMADAS CONSTITUINTES

4.4.2.1. Identificação das camadas

Os revestimentos tradicionais para paramentos exteriores são constituídos por três ou mais camadas, que são o crespido, a camada de base e a camada de acabamento.

Os revestimentos devem ser constituídos por várias camadas, pois conduz à redução das larguras das fendas à superfície e desencontra o seu desenvolvimento em espessura, passando a ser pouco provável que uma fenda atravesse simultaneamente todas as camadas e atinja o suporte.

Cada camada do revestimento deve ser sempre mais "fraca" do que a camada subjacente (no sentido do suporte para o exterior) para que não deteriore por retracção e para que seja cada vez menor a tendência para fendilhação. Assim, a resistência mecânica do suporte terá de ser sempre superior à da primeira camada contínua de revestimento.

Constata-se frequentemente em obra que a última camada de reboco é mais forte que a anterior, julgando o empreiteiro que tal situação seria benéfica para uma melhor impermeabilização do paramento. No entanto, posteriormente constatava-se o contrário, pois o reboco fissura de um modo generalizado [34, 49].

4.4.2.2. Crespido

Esta camada tem como finalidade assegurar a aderência do revestimento ao suporte, devendo ser rugosa, rica em cimento e fluída. Deve constituir uma camada descontínua e com uma espessura entre 3 a 5 mm.

4.4.2.3. Camada de base

A esta camada compete garantir a planeza, a verticalidade e a regularidade superficial das paredes, fornecendo ainda o principal contributo para a impermeabilização das paredes e proporcionando simultaneamente uma boa aderência à camada de acabamento. Deverá ser compacta, homogénea e com fraca tendência para a fendilhação, por forma a garantir a impermeabilização.

Há situações em que são necessárias duas camadas de base em vez de uma única. Tal será necessário quando o suporte do revestimento for uma armadura metálica, quando a espessura necessária para a regularização ou desempeno da parede for superior ao limite máximo de 15 mm, ou quando a camada de acabamento não for contínua ou for muito delgada.

A espessura deverá variar entre os 10 a 15 mm, sendo no mínimo 8 mm. Caso se aplique mais do que uma camada de base, a espessura total não deverá ultrapassar os 20 mm.

4.4.2.4. Camada de acabamento

Esta camada tem fundamentalmente funções estéticas, apesar de também contribuir para a impermeabilização da parede e para a sua resistência aos choques. Nesse sentido, deverá preencher as fendas que se possam ter formado da camada de base.

Para que não fendilhe terá que possuir um teor em ligante relativamente baixo e ser obtida a partir de argamassas bastardas com presença significativa de cal apagada.

A espessura deverá variar entre os 5 e 10 mm, conforme a textura da superfície. Alguns acabamentos do tipo projectado fino podem ter espessura inferior, na ordem dos 3 mm.

4.4.3. ANOMALIAS

As anomalias que se fazem sentir pouco tempo após a realização dos revestimentos, ou ao longo do tempo são:

- anomalias devido à acção da humidade, como a formação de eflorescências ou de criptoflorescências, desenvolvimento de vegetação parasitária ou de fungos, amolecimento do revestimento, desagregação de rebocos fracos, e alterações de cor e de aspecto;
- fendilhação, devido à retracção de argamassas demasiado ricas ou com espessuras demasiado elevadas, não cumprimento dos tempos de secagem recomendados, assentamento dos suportes das paredes ou assentamento diferenciado das fundações, e concentração de cargas nos membros das paredes conduzindo a fissuras verticais ou inclinadas a partir dos ângulos dos vãos;
- empolamento do reboco devido ao ataque da argamassa pelos sulfatos solúveis na água, em consequência da presença prolongada de água no suporte;
- destacamento, como a queda de porções localizadas com zonas de paredes que permaneçam prolongadamente húmidas, na sequência do fenómeno do empolamento, e queda de porções ou da totalidade do reboco por falta de aderência ao suporte.

4.5. REBOCOS NÃO TRADICIONAIS DE LIGANTES HIDRÁULICOS

4.5.1. DEFINIÇÃO DOS REBOCOS NÃO TRADICIONAIS

Os rebocos não tradicionais são executados a partir de produtos em pó, pré-doseados em fábrica e prontos a amassar com água em obra. Estes rebocos destinam-se a substituir os rebocos tradicionais no revestimento de paramentos exteriores, pelos inconvenientes que apresentam como a falta de mão-de-obra qualificada, mau doseamento em obra dos constituintes, execução demasiado rápida, deficiente humedecimento do suporte, deficiente cura, entre outros.

Em Portugal a introdução destes produtos fez-se de uma forma mais ou menos generalizada nos últimos anos. Os produtos comercializados quer sejam de produção nacional quer sejam importados são em monocamada, semelhantes aos fabricados em França, designados entre nós por “monomassas”. À semelhança dos rebocos tradicionais de ligantes hidráulicos são revestimentos de impermeabilização.

Como são produtos não tradicionais, a sua aplicação está condicionada à prévia homologação pelo LNEC. Nos documentos de homologação são especificadas as características dos produtos, a aplicação em obra, a manutenção, as modalidades de comercialização e as condições de emprego [34, 49].

4.5.2. ANOMALIAS

No caso dos rebocos não tradicionais de ligantes hidráulicos, as patologias mais correntes são:

- fendilhação do suporte: em suportes de reduzida resistência mecânica a aplicação de revestimentos de resistência mecânica elevada ou de retracção e rigidez elevadas provocam este tipo de fissurações;
- fendilhação: abertura de fendas em correspondência com fendas do suporte ou nas ligações entre suportes de natureza diferente. Resulta normalmente da fendilhação do suporte ou por deformações dos elementos estruturais transmitidas às alvenarias, numa parede revestida em continuidade;
- eflorescências: resultam da cristalização à superfície de sais solúveis contidos nos materiais das paredes, na própria argamassa ou no terreno;
- manchas: as heterogeneidades de cor e de textura resulta de variadas condições de amassadura e de aplicação que não permanecem constantes.

4.6. REVESTIMENTOS DE PEDRA NATURAL

4.6.1. DEFINIÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE PEDRA NATURAL

Os revestimentos de fachadas com pedra natural são constituídos por placas obtidas a partir de rochas ornamentais sendo as mais requisitadas, os mármores e os granitos. Estes revestimentos podem ser auto-portantes ou não resistentes.

Os revestimentos auto-portantes são independentes do suporte e suportam o seu peso próprio por encosto topo a topo. Normalmente são constituídos por placas de espessura mínima de 75 mm e permitem a execução de uma caixa-de-ar ventilada e eventualmente a interposição de isolamento térmico. A fixação ao suporte faz-se por intermédio de gatos de forma a garantir a estabilidade ao derrubamento.

Os revestimentos não resistentes são os mais utilizados em Portugal, sendo aplicados normalmente em edifícios de custo elevado, uma vez que esta solução onera significativamente a execução de fachadas. Nesta solução todas as acções inerentes ao revestimento são suportadas pelo próprio suporte e/ou estrutura. É possível distinguir dois tipos de fixação: a fixação directa e a fixação indirecta.

A fixação directa pode ser por colagem (cimento cola, adesivo sem cimento e argamassa cola com ou sem resina incorporada) ou por selagem (argamassa de cal hidráulica ou de cimento branco).

A fixação indirecta pode ser executada por intermédio de agrafos e pontos de argamassa, por meio de gatos e por meio de um estrutura intermédia de perfis metálicos, ou ripado de madeira à qual as placas são fixadas mecanicamente através de gatos ou agrafos.

Este tipo de fixação indirecta permite conferir aos revestimentos uma classificação de revestimentos de estanquidade, ao contrário da fixação directa que apenas confere um grau de decoração [34, 49].

4.6.2. PLACAS DE PEDRA

As placas de pedra mais vulgarmente utilizadas são rectangulares, necessitando-se de uma a três placas para revestir um metro quadrado de superfície. De forma a minimizar os eventuais riscos de desprendimento, as espessuras das placas não deverão ser inferiores a:

- placas não resistentes: 27 mm no caso geral e, sem excepção no caso de placas obtidas por clivagem, e 20 mm no caso de placas talhadas, desde que sejam aplicadas em zonas de parede de cota não superior a 6 m relativamente ao piso de circulação ou de

permanência de utentes (ruas, corredores, terraços, varandas, etc.), e a largura dos espaços atrás referidos não seja inferior a 0,60 m;
- placas resistentes: 75 mm em qualquer situação.

De forma a tornar o sistema estanque, os dispositivos de fixação devem tornar o revestimento independente do suporte, formando-se uma caixa-de-ar ventilada que deverá possuir uma espessura entre 20 e 50 mm, provida de dispositivos de evacuação da água infiltrada para o exterior através das juntas entre placas. A inserção de isolamento térmico entre o suporte e as placas, deverá manter livre a referida caixa-de-ar, sendo colocado junto ao suporte [34, 49].

4.7. SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO POR REVESTIMENTO DELGADO SOBRE ISOLANTE

4.7.1. DEFINIÇÃO DO REVESTIMENTO DELGADO SOBRE ISOLANTE

Os sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre isolante são um sistema não tradicional, pelo que obriga a que sejam devidamente homologados pelos organismos certificados para o efeito.

Estes sistemas podem ser considerados como de impermeabilização, pois contribuem fortemente para a estanquidade global à água da parede. Estes revestimentos começaram a ser usados no nosso país de uma forma mais corrente nos últimos anos.

Em Portugal este sistema tem encontrado o maior emprego no sector da reabilitação de fachadas, uma vez que permite de uma forma simplificada e rápida, a eliminação de infiltrações de humidade, assim como a correcção do isolamento térmico das fachadas sem provocar grande incómodo aos habitantes.

Ao permitir também uma simplificação do processo construtivo das fachadas prescindindo do uso de paredes dupla, este revestimento tem vindo também a ser aplicado em novos edifícios. Contudo, constata-se que nem sempre são tomados em consideração os cuidados de execução, podendo motivar uma degradação prematura desta solução em determinados locais [49].

4.7.2. CAMADAS CONSTITUINTES

Um sistema de isolamento térmico por revestimento delgado sobre isolante, pressupõem a existência dos seguintes constituintes:

- cola, produto destinado à fixação por aderência do isolamento ao suporte, podendo apresentar-se em forma de pasta pronta a aplicar, ou em pasta necessitando da adição de outros produtos, ou ainda em pó necessitando da adição de outras substâncias;
- isolante, produto de elevada resistência térmica geralmente pré-fabricado, que se destina a conferir às paredes em que for aplicado, o isolamento térmico pretendido;
- camada de base, é uma camada delgada aplicada directamente sobre o isolamento (2 a 5 mm), que contém a armadura e assegura a maior parte das características do revestimento. Esta camada é aplicada em duas demãos ficando entre elas a armadura;
- armadura, é uma rede ou tela, mineral ou metálica, incorporada na camada de base para melhorar a resistência mecânica e lhe assegurar continuidade, sendo a mais utilizada a fibra de vidro;
- camada de primário, é uma camada muito delgada aplicada sobre a camada de base e destinada a favorecer a aderência à camada de acabamento;

- camada de acabamento, é uma camada delgada final aplicada sobre a camada de primário, destinada a conferir o aspecto final ao sistema de isolamento térmico;
- fixações mecânicas, são utilizadas em complemento da cola, para fixação do isolamento ao suporte por meios mecânicos;

4.8. REVESTIMENTOS POR ELEMENTOS DESCONTÍNUOS COM FUNÇÃO DE ACABAMENTO

Os revestimentos descontínuos não possuem caixa-de-ar, podendo ou não as juntas entre elementos ser permeáveis, leva a que a classificação dos mesmos seja a de elementos de acabamento ou decorativo.

Por não serem revestimentos de impermeabilização nem de regularização superficial, só devem ser aplicados em suportes em que o desempenho dessas funções já se encontre completa ou maioritariamente garantido, pela própria parede ou pelo prévio revestimento.

Para além do aspecto que conferem às superfícies, os revestimentos de acabamento contribuem também para a protecção mecânica e química das mesmas, assim como pode contribuir para um aumento da resistência ao fogo das paredes. Os elementos descontínuos fazem diminuir as necessidades de manutenção das fachadas.

Estes revestimentos podem ser fixos por colagem ou mecanicamente.

Os revestimentos aplicados por colagem obrigam às seguintes fases:

- regularização do suporte com argamassa tradicional;
- emprego do produto de colagem;
- aplicação dos elementos de revestimento superficial.

Os materiais aplicados por colagem são normalmente os ladrilhos de barro vermelho, os azulejos de faiança, os ladrilhos de grés, os ladrilhos de vidro opaco, argamassas ou betões, e pedra natural. Os ladrilhos de barro vermelho ou os azulejos de faiança não são indicados para o revestimento pelo exterior das fachadas por serem materiais bastante porosos, não resistindo ao aumento de volume que acompanha a formação de gelo.

Os revestimentos aplicados por fixação mecânica directa dizem normalmente respeito à aplicação de pedras naturais ou artificiais e à aplicação de placas de argamassa ou de betão [49].

5

FISSURAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA

5.1. GENERALIDADES

As alvenarias em Portugal têm sido repetidamente construídas com base em projectos sumários ou inexistentes, situação que se agrava no caso de paredes sem qualquer função estrutural. No entanto, as paredes de alvenaria têm visto evoluir as suas exigências de desempenho e têm sofrido alterações nas suas funções, constituição, materiais e técnicas de construção.

Com a publicação do RCCTE [21], a preocupação com o desempenho térmico das paredes tem levado à procura de soluções construtivas mais adequadas à conservação de energia e à redução das patologias de carácter higrotérmico.

Assim, e de modo a limitar as patologias que se verificam nos edifícios, devido à utilização de técnicas construtivas pouco adaptadas à realidade da nossa construção, foi necessário aplicar soluções tecnológicas alternativas que permitam eliminar essas patologias e, simultaneamente cumpram a regulamentação térmica.

5.2. A EVOLUÇÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE E DA ALVENARIA EM PORTUGAL

Em Portugal não existe nenhum estudo muito aprofundado sobre a evolução das soluções de paredes de alvenaria, no entanto é possível afirmar que as soluções ditas tradicionais começaram a evoluir a partir de meados do século XX, mas nem sempre de uma forma adaptada às condições locais e à evolução das exigências.

Até aos anos 40 as fachadas eram constituídas por um pano de elevada espessura em alvenaria da pedra ou de tijolo maciço. Na década seguinte surgiram as primeiras paredes duplas, com pano exterior de alvenaria de pedra e uma forra interior em alvenaria de tijolo.

A partir da década de 40 assiste-se a uma utilização mais generalizada das estruturas porticadas de betão armado, o que originou uma substituição das tradicionais paredes de pedra pelas unidades de alvenaria cerâmicas e outros materiais, praticamente sem função estrutural, uma vez que são simples panos de enchimento. Com a utilização corrente de unidades de alvenaria cerâmicas foram desenvolvidos diferentes formatos, passando-se de unidades de alvenaria maciças para unidades de furação horizontal, sucessivamente mais aligeiradas e com melhores propriedades em termos de isolamento térmico. Nas décadas de 60 e 70 a parede dupla tornou-se a principal solução de parede de fachada, permitindo:

- reduzir o peso das paredes e a espessura dos panos;
- melhorar a produtividade e economia nos custos de mão-de-obra;
- melhorar a estanquidade à água da chuva e as características térmicas e acústicas.

Inicialmente o pano exterior era significativamente mais espesso que o interior, mas houve uma redução dessa espessura, até que, já na década de 70, os dois panos apresentavam dimensões idênticas, e por vezes muito reduzidas.

Durante os anos 80, começaram a introduzir-se materiais de isolamento térmico a preencher, total ou parcialmente, a caixa de ar das paredes. Inicialmente não havia grande preocupação com o tratamento das pontes térmicas, o que foi alterado com a entrada em vigor, em 1991, do primeiro regulamento de térmica, RCCTE.

Na década de 90, foram introduzidos em Portugal sistemas de isolamento térmico pelo exterior e pelo interior, sendo estes últimos menos utilizados no nosso país. Normalmente, os sistemas de isolamento pelo exterior são aplicados sobre um suporte constituído por uma parede de alvenaria ou em betão armado [50, 51].

Ao longo deste processo evolutivo manteve-se a tradição de rebocar as paredes. No entanto, os rebocos à base de ligantes aéreos foram substituídos por rebocos hidráulicos e a qualidade de execução tornou-se menos cuidada. A evolução das paredes exteriores encontra-se sintetizada na fig. 5.1.

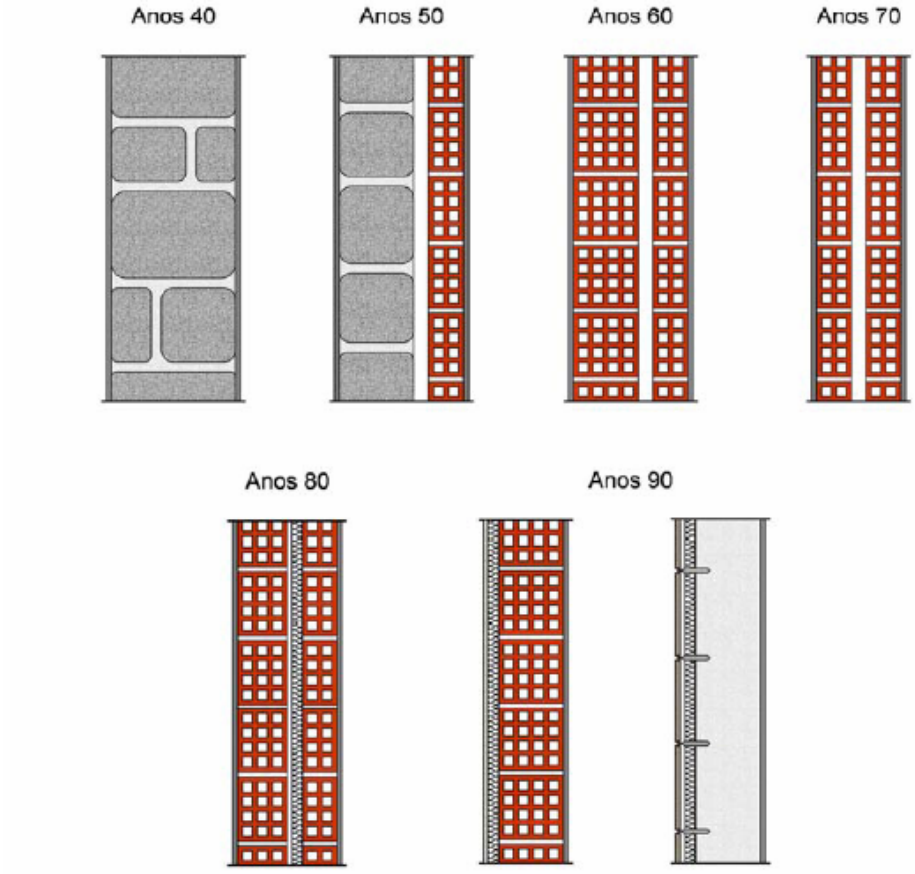


Fig. 5.1 – Evolução das paredes de alvenaria exteriores em Portugal [50]

As anomalias e ocorrências patológicas associadas às soluções tradicionais são frequentes, resultando de um processo em que o enquadramento regulamentar é praticamente inexistente. A escolha e

pormenorização da solução a adoptar na envolvente das construções não é objecto de uma atenção e pormenorização na fase de projecto compatível com a sua importância, sendo normalmente deixada ao critério dos seus executores.

Relativamente às paredes exteriores actualmente usadas em edifícios, poderá dizer-se que:

- são de simples preenchimento, duplas, não ultrapassando em geral o pano mais espesso 15 cm de espessura, executadas com tijolo cerâmico de elevada furação horizontal e mecanicamente pouco resistente, com utilização frequente de isolantes na caixa de ar;
- as paredes duplas são normalmente pouco cuidadas ao nível da ligação entre panos, drenagem e ventilação na caixa de ar, fixação do isolamento térmico, atenuação de pontes térmicas e ligação à estrutura;
- as soluções de pano simples são pouco utilizadas, sendo em regra geral blocos de betão de argila expandida;
- as soluções de parede simples com isolamento pelo exterior têm vindo a crescer, começando a ser uma solução bastante corrente;
- não existem produções industrializadas de acessórios e elementos para a resolução de pontos singulares das paredes, o que origina situações de improviso e de falta de qualidade;
- as paredes são revestidas por rebocos tradicionais (normalmente ricos em ligantes hidráulicos) pouco porosos e realizados por uma mão-de-obra pouco especializada, embora o emprego de alguns pré-doseados tenham vindo a aumentar significativamente nos últimos tempos;
- o acabamento dos rebocos é feito, frequentemente por pintura, apesar dos revestimentos cerâmicos e de pedra terem também alguma expressão.

5.3. PRINCÍPIOS GERAIS DE CONSTRUÇÃO

5.3.1. MODULAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

Os módulos são números de proporcionalidade para as grandezas técnicas. A unidade de base de ordem modular na Europa é o módulo de base M, que foi fixado para um valor de 10 cm. Com o objectivo de limitar a diversidade das dimensões possíveis dos elementos de construção e de dimensionar cuidadosamente a dimensão modular e os funcionamentos dos elementos de construção, foram definidos os multi-módulos, isto é, os múltiplos do módulo M. Os múltiplos ou módulos de planificação são determinantes para a estruturação sistemática do desenho. Dos múltiplos dos módulos de planificação resultam os módulos de estruturação, os quais determinam a estrutura e a coordenação, ligadas à elaboração dos planos de construção. Esses módulos de estruturação resultam da adição ou subtracção dos múltiplos. Por razões práticas, as dimensões devem ser limitadas a um certo número de múltiplos, sendo as dimensões mais correntes caracterizadas por várias possibilidades de subdivisão. Com base nos multi-módulos é possível definir valores modulares funcionais para as diferentes actividades humanas [52].

No que diz respeito à malha, esta é um sistema de coordenação geométrico espacial, que comporta uma sucessão regular de espaçamentos idênticos entre linhas de referência, designado por dimensões modulares. Os espaçamentos da malha são definidos sobre um módulo ou sobre um múltiplo do módulo. Na maioria dos casos a forma base da malha é um rectângulo ou um quadrado. A malha permite definir a posição de cada elemento de construção e coordenar este com os outros elementos. É importante referir que as dimensões entre eixos, com base nos módulos de estruturação, determinam

os espaçamentos dos traçados teóricos do desenho de construção e constituem o sistema de coordenação.

A coordenação de elementos de construção individuais exige uma posição adequada de planos de referência e, por conseguinte a sua ponderação, isto é, a definição de uma malha principal e de uma malha auxiliar. Habitualmente, a malha da estrutura é definida como principal e a malha do trabalho secundário como auxiliar. As relações mais correntes entre as malhas da fachada e da estrutura são a disposição em concordância e desfasadas. No caso da sobreposição da estrutura com as paredes exteriores, os formatos específicos tornam-se necessários para a escolha dos módulos, por exemplo, em relação com a referência ao eixo, devido aos desvios dimensionais dos panos de ligação. Devido ao desfasamento das zonas da estrutura resistente e da fachada, é possível dispô-las de forma independente [52], conforme a fig. 5.2.

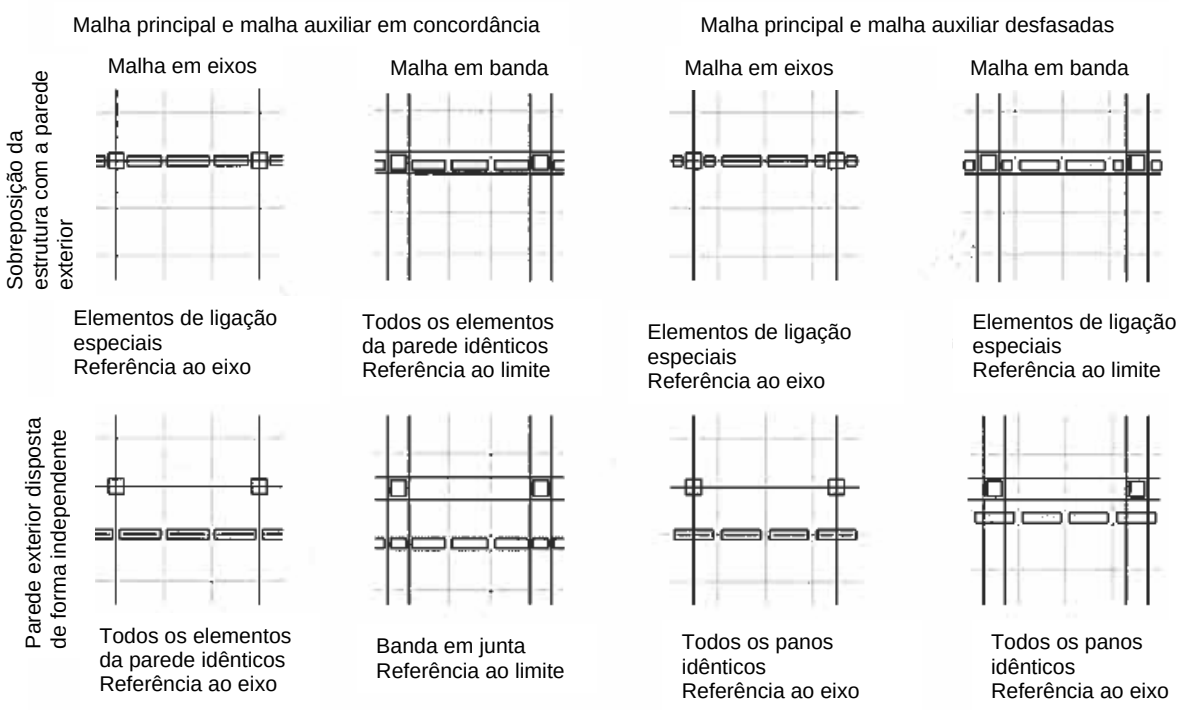


Fig. 5.2 – Exemplos de malhas principais e malhas secundárias [52]

Da sobreposição ou posição independente das zonas modulares associadas à disposição em concordância ou desfasadas dos sistemas de referência, resultam diferentes condições construtivas, devido à dimensão dos elementos de construção e da ligação destes à estrutura resistente e à envolvente, nomeadamente na zona dos ângulos externos e internos [52], de acordo com a fig. 5.3.

As decisões dimensionais de coordenação modular são de natureza geral, pelo que o fabrico de elementos de construção especiais exigem dimensões ditas de coordenação. A dimensão de coordenação, R, é a quota de espaçamento dos planos de referência, que delimitam a posição e as dimensões de um elemento construtivo, normalmente uma medida modular. A dimensão de fabrico, H, pode ser derivada da quota de coordenação, tendo em consideração a zona das juntas. As superfícies de ligação de um elemento de construção e as tolerâncias dimensionais são $H < R$. De acordo com a forma dada às ligações, a dimensão de fabrico pode estender-se para além do espaço modular, sendo possível $H > R$. Neste caso, convém ter em conta uma dimensão de ligação, que regula as dimensões entre os elementos construtivos [52], conforme a fig. 5.4.

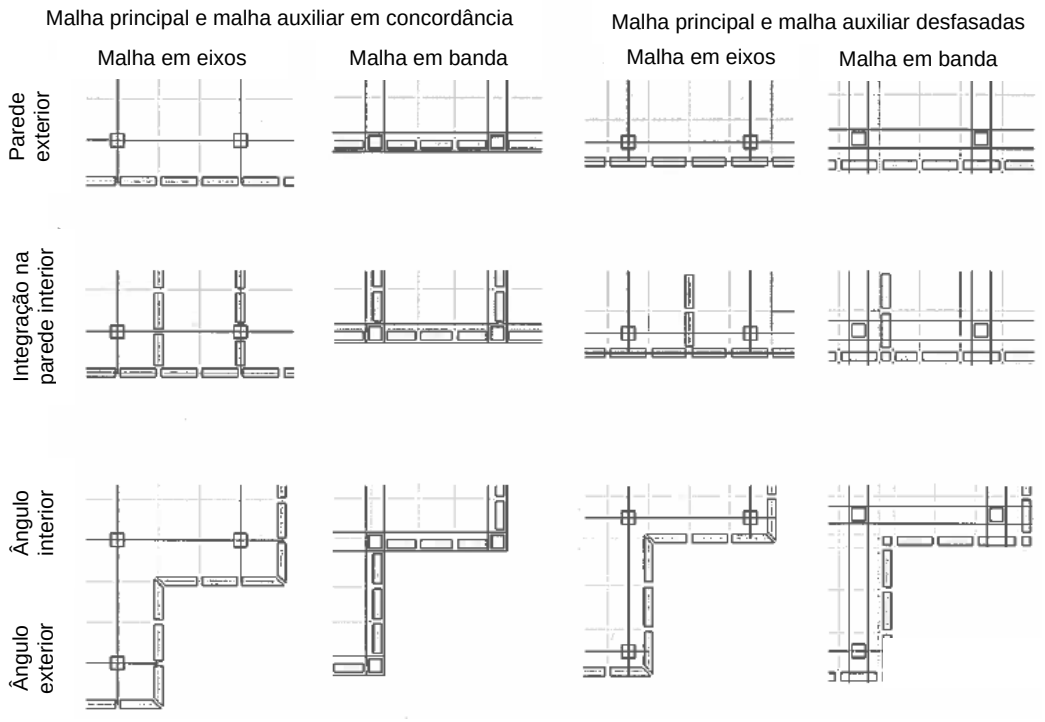


Fig. 5.3 – Exemplos de disposições construtivas [52]

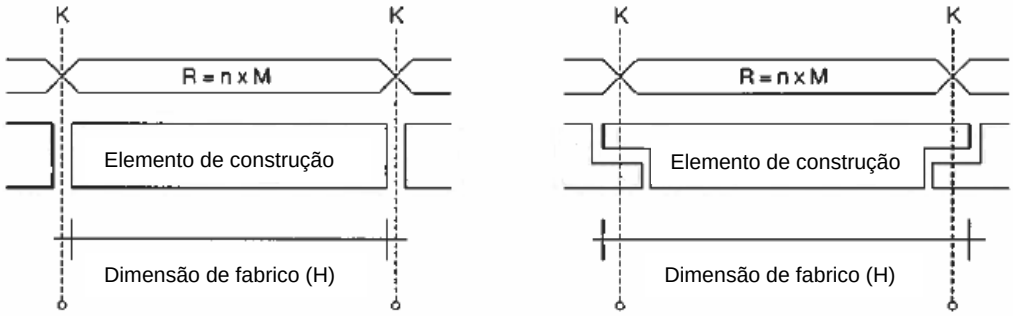


Fig. 5.4 – Dimensões de coordenação e de fabrico [52]

5.3.2. POSIÇÃO RELATIVA DA ESTRUTURA

A posição da parede exterior em relação à estrutura é uma das causas mais relevantes que pode originar consequências de ordem física sobre o aspecto externo das paredes, para além das diferentes condições de ligação. Deste modo, é possível distinguir as seguintes posições relativas da estrutura no caso de paredes exteriores não resistentes [52], de acordo com a fig. 5.5:

- à frente dos pilares (1);
- à frente dos pilares e adjacente (2);
- entre os pilares (3);
- atrás dos pilares e adjacente (4);
- atrás dos pilares (5).

Estas relações geométricas determinam, designadamente, a dependência da divisão de fachada no que diz respeito à estrutura, a concepção das ligações às paredes interiores e o grau de penetração da

parede exterior no plano dos pilares e dos pavimentos. Outra característica importante é a integração dos elementos da estrutura horizontal (pavimentos) nos elementos verticais (pilares). Em princípio, é possível para o caso de paredes exteriores não resistentes, distinguirem-se as seguintes situações [52], conforme fig. 5.5:

- integrando os pilares (A);
- salientes (B);
- à face com a superfície antes dos pilares (C).

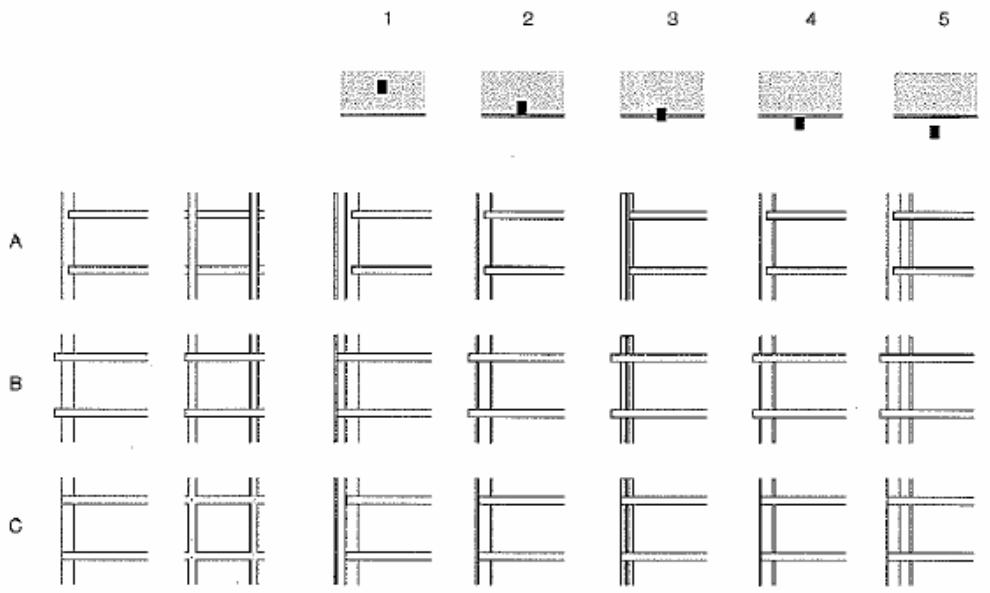


Fig. 5.5 – Posições geométricas da fachada em relação à estrutura [52]

Do ponto de vista construtivo, a posição e a disposição dos pilares são importantes para a modelação e fixação da fachada, a ligação às paredes interiores e a condução das instalações até à protecção contra incêndios. Do ponto de vista da física das construções, as exigências resultantes da posição dos pilares relativamente à parede exterior são:

- a deformação (deformações lineares devido às diferenças de temperatura);
- as pontes térmicas (condução pelos elementos construtivos adjacentes);
- as pontes acústicas (transmissão de ruídos entre o interior e o exterior);
- a protecção contra intempéries.

Da mesma maneira, a posição e disposição dos pilares também influenciam a divisão da fachada. Assim, no caso de um espaçamento entre pilares pequeno é possível atribuir uma forma regular aos painéis, enquanto que no caso de pilares exteriores afastados, pode ser necessário recorrer a elementos especiais, devido às diferentes dimensões e em função da posição e disposição.

5.3.3. JUNTAS DE DILATAÇÃO

5.3.3.1. Importância das juntas de dilatação

As juntas de dilatação são muitas vezes utilizadas na construção para suportar a heterogeneidade dos materiais, que por terem características diferentes têm também comportamentos distintos. Assim, estes elementos, se bem concebidos, permitem evitar a ocorrência de muitas anomalias.

As juntas são inevitáveis e são constituídas por um corte em diferentes situações, como:

- em obras contíguas constituídas por materiais diferentes ou com comportamentos muito diferentes, tal como a ligação entre a parede e a caixilharia;
- em obras em que se tem de permitir os movimentos da parte móvel em relação à parte fixa.

É importante salientar que as juntas de dilatação são necessárias nas construções, uma vez que permitem limitar as consequências dos assentamentos das fundações, assentamentos diferenciais em especial, devido aos efeitos das variações térmicas entre a parte em elevação da construção e a sua parte enterrada e, principalmente, os efeitos dos deslocamentos diferenciais duma parede da construção em relação a outra. As juntas recortam a construção em segmentos independentes, sendo obturadas por perfis plásticos ou de metal, com uma espessura geralmente de 2 a 3 cm. Em caso de construções em zonas sísmicas as juntas devem ser mais espessas.

As características principais das juntas de dilatação que definem a sua geometria são a transmissão de esforços e a estanquidade à água. No entanto, as propriedades de transmissão térmica e acústica das juntas também devem ser tidas em consideração [53].

5.3.3.2. Transmissão de esforços

A função principal das juntas é transmitir os esforços na maior parte dos casos à estrutura ou transmitir os esforços com origens diversas à fundação.

A transmissão de esforços pode ser considerada em diferentes fases, como:

- em fase de montagem, em que se devem resolver os problemas de estabilidade provisória, de transmissão dos esforços pelas superfícies e dispositivos disponíveis na presente fase;
- nas condições correntes de exploração;
- em situações excepcionais ou acidentais (vento, incêndio, sismo, etc.).

As características das juntas podem variar no tempo, devido ao envelhecimento dos materiais e da modificação das interfaces (por exemplo, a variação no tempo da resistência do betão e da aderência), e também devido ao efeito das solicitações em obra sobre os componentes e ligações.

As condições correntes de exploração e as situações excepcionais ou acidentais são evidentemente as características que a longo tempo degradam mais as juntas de dilatação, pelo que é necessário ter em atenção essas condições [53].

5.3.3.3. Estanquidade à água das juntas na envolvente vertical

A geometria das juntas deve ser escolhida de maneira a respeitar quatro princípios fundamentais:

- obter a impermeabilidade ao ar das juntas;
- afastar a água da descontinuidade que pode constituir uma via de penetração;
- suprimir ou reduzir os fenómenos que podem dar origem à entrada de água para o interior através da junta, como a acção da gravidade, capilaridade e impulso consequente de uma diferença de pressão de ar;
- drenagem da água.

No caso da impermeabilidade ao ar das juntas, esta condição deve imperativamente ser satisfeita, incluindo nos pontos de cruzamento das juntas verticais e horizontais. A impermeabilidade ao ar deve

ser suficiente de modo a que não exista nenhum fluxo de ar a atravessar a junta e que possa provocar a entrada de água em zonas críticas. A geometria da junta não impede só a entrada de ar, mas desempenha também uma função determinante na boa localização do revestimento.

No caso das juntas horizontais qualquer elemento existente e que impeça a entrada de água pode ser considerado com um primeiro obstáculo à penetração de água. Nas juntas verticais, os dispositivos como ecrãs e pára-chuvas desempenham um papel análogo.

A forma das juntas, tanto verticais como horizontais, não deve permitir a entrada directa de água por gravidade do exterior para o interior. No entanto, a dificuldade às vezes está em identificar os possíveis caminhos de entrada de água, dado a água fluir sobre as superfícies de uma forma bastante complexa. Quando os caminhos são identificados, uma solução passa por criar barreiras, sem alterar muito as formas. Estes obstáculos à progressão da água para o interior são eficazes apenas se na parte exterior desses obstáculos a água for drenada convenientemente.

No que se refere à capilaridade é importante garantir que nenhuma espessura inferior a 5 mm que não seja obturada, possa ser alimentada por água, como é o caso dos orifícios entre paredes. Além disso, as superfícies como é o caso das superfícies de contacto entre uma peça de betão e a argamassa ou o betão de montagem, e entre uma superfície metálica e um cordão de espuma rígida são vias possíveis de infiltração capilar. Estas zonas não devem ser atingidas por água, devendo localizar-se na parte traseira do dispositivo de impermeabilidade.

As cavidades que comportam as juntas de dilatação devem estar em contacto com o exterior, de modo a que não exista entre essas cavidades e o interior uma diferença de pressão que possa empurrar a água para o interior.

No que se refere à drenagem da água é importante garantir:

- a existência nas juntas verticais de câmaras; para evitar caminhos aleatórios da água, ou seja, para canalizá-la, as superfícies da câmara devem comportar ranhuras;
- a existência de uma abertura que permita a saída da água para o exterior e que deve, evidentemente, ser realizado de modo a não constituir uma via de entrada de água; normalmente tenta-se igualar a pressão de ar nas cavidades da junta e a pressão exterior.

A fig. 5.6 ilustra esquematicamente diferentes princípios de organização de juntas que, no caso das paredes verticais simples ou duplas, obedecem às condições acima identificadas, mas cuja aplicação prática necessita de algumas precauções que têm em conta as propriedades dos materiais.

No que se refere ao revestimento das juntas, em muitos casos é obrigatório utilizar-se mastique para se constituir um dispositivo de impermeabilidade. Este mastique é muito solicitado, quer pelas condições de exposição quer pelas variações dimensionais que sofre. Assim, importa escolher um mastique que tenha características apropriadas e que possibilitem um correcto funcionamento durante o seu período de vida útil.

Esta preocupação com a escolha dos revestimentos de juntas, tendo em conta principalmente as condições de exposição e as variações dimensionais das juntas, é aplicável a outros tipos de revestimentos, como os perfis elásticos ou semi-rígidos [53].

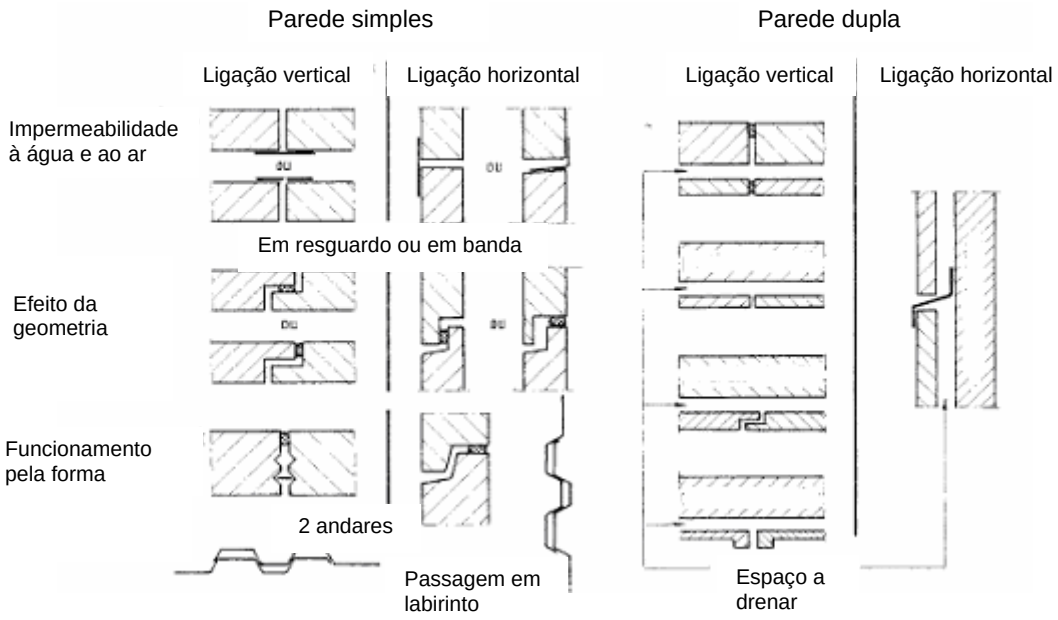


Fig. 5.6 – Diferentes princípios de organização das juntas para uma eficaz estanquidade à água [53]

5.3.3.4. Características térmicas das juntas

Como já foi referido é raro a geometria da junta ser determinada pelas características térmicas, sendo geralmente definida por outras características fundamentais. A partir dessa geometria, normalmente obtêm-se propriedades satisfatórias ou simplesmente aceitáveis em termos térmicos.

O coeficiente de transmissão de calor pela junta, *U*, é o desempenho que caracteriza a junta a esse respeito. É importante garantir que as pontes térmicas que existem são eliminadas quando as juntas ou as zonas vizinhas dos componentes não se interpõem entre os meios internos e externos dos materiais de condutibilidade elevada ou quando camadas de materiais que isolam são interrompidas por materiais bons condutores.

5.4. CAUSAS DE INSTABILIDADE E FISSURAÇÃO DE PAREDES DE ALVENARIA

A fissuração das paredes tem representado nos últimos anos uma preocupação crescente em Portugal, com consequências diversas, entre as quais as mais graves são no domínio das humidades e dos fenómenos de instabilidade, mas ainda com efeitos negativos noutros domínios, como infiltrações de ar, redução do isolamento acústico e térmico. No presente trabalho a preocupação principal diz respeito à influência das variações de temperatura no desempenho das paredes de alvenaria, pelo que será necessário conhecer as suas consequências. É importante salientar que a fissuração pode denunciar problemas de estabilidade ou apenas situações de rotura localizada sem outras repercussões.

As causas principais de instabilidade e fissuração das paredes de fachada podem subdividir-se em 3 grupos:

- causas de origem física, tais como variações de temperatura, acção da humidade, acção do gelo, degradação natural, acção do fogo;
- causas de origem química, como retracção da argamassa, expansão irreversível do tijolo, corrosão e oxidação, acção dos sulfatos;

- causas de origem mecânica, tais como cargas externas e localizadas, deformação de suporte, grampeamento deficiente, esbelteza e encurvadura excessiva, apoio insuficiente.

É de referir que quer as causas físicas, quer as causas químicas, se acabam por traduzir em acções mecânicas através dos movimentos internos que provocam nos materiais e cuja restrição gera tensões responsáveis pela fissuração.

A preocupação com a estabilidade das paredes é acrescida, pelo facto de as paredes serem concebidas e construídas sem qualquer função estrutural, virem a suportar com o tempo cargas significativas para as quais não estavam preparadas.

5.5. PRINCIPAIS CAUSAS PARA A INSTABILIDADE E FISSURAÇÃO DE PAREDES

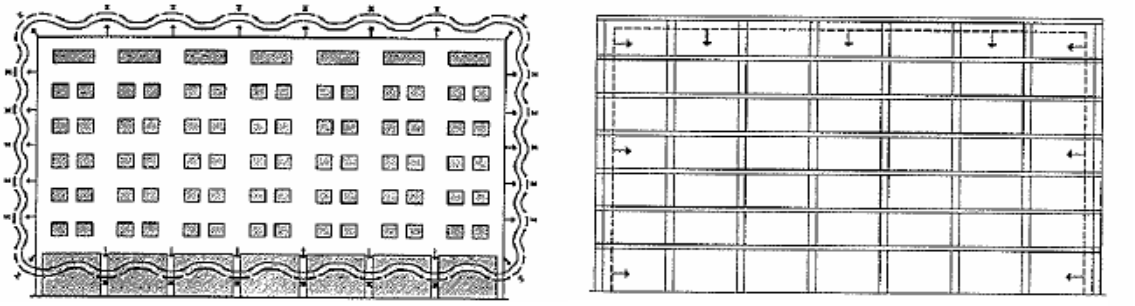
5.5.1. VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

Quase todos os materiais utilizados na construção em Portugal são sensíveis às solicitações térmicas, em função de vários factores:

- condições de exposição aos agentes atmosféricos;
- geometria dos elementos construtivos em que se inserem;
- características dos elementos de protecção;
- características térmicas intrínsecas (condutibilidade térmica, massa específica, calor especifico e coeficiente de absorção da radiação solar).

Os materiais empregues na constituição de fachadas podem atingir diferentes temperaturas, ou mesmo diferentes distribuições de temperatura, caso apresentem características físicas diversas. Todas as variações de temperatura provocam dilatações e contracções, cuja restrição gera tensões que podem ser responsáveis pela fissuração, ou em último caso constituir um factor adicional de perda de estabilidade.

Num edifício de grandes dimensões comprova-se que os movimentos das unidades de alvenaria e da estrutura são opostos, de tal forma que ao longo do tempo enquanto a envolvente tende a crescer, a estrutura tende a retrair, conforme a fig. 5.7. Como a parede de alvenaria tem os seus movimentos e deformações limitados pela estrutura porticada que a obriga a mover-se em função da sua deformação, facilmente se obtêm tensões capazes de fissurar a envolvente [54].



Expansão do material cerâmico por acção térmica

Retracção da estrutura

Fig. 5.7 – Movimentos das unidades de alvenaria cerâmica e da estrutura [54]

Pelo facto de a estrutura e o material cerâmico apresentarem movimentos opostos, no caso de edifícios com ausência de juntas de dilatação, verticais e horizontais, é possível a ocorrência de fissuração em

diferentes zonas da alvenaria, conforme a fig. 5.8. Devido às variações de temperatura são geradas tensões nas esquinas das janelas que podem originar fissuras diagonais nessa zona, assim como deslocamentos em todo o perímetro da fachada que podem fissurar se for impedido o seu movimento pela estrutura ou pelas paredes ortogonais [54].

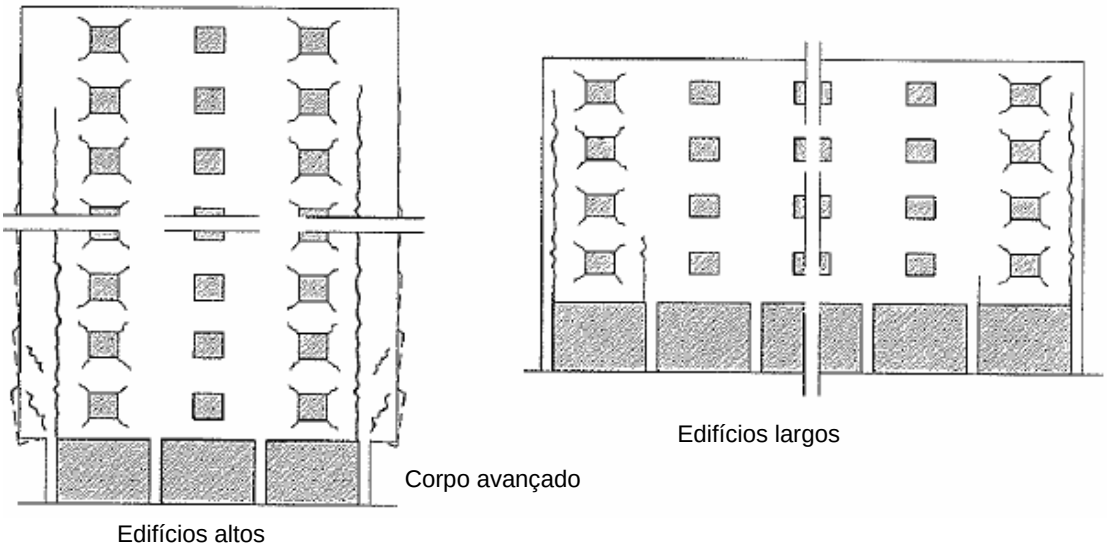


Fig. 5.8 – Paredes de alvenaria sem juntas de dilatação [54]

A dilatação e contracção das paredes sujeitas a variações uniformes de temperatura podem provocar um significativo aumento de tensões e eventual fissuração em diversas situações:

- zonas de ligação da parede com outros elementos construtivos;
- cunhais não reforçados e ligação de paredes de fachada com paredes interiores;
- zonas da parede em que a geometria favoreça a concentração de tensões;
- juntas, revestimentos ou apoios;
- paredes não confinadas;
- ligação tijolo-argamassa, devido à dilatação diferencial.

Nos casos de aquecimento diferencial na própria parede, é frequente a fissuração nas zonas onde se verifica a transição de temperatura ou nos pontos frágeis mais próximos (aberturas, reduções de secção, etc.), resultante das condições de sombreamento, da variação de cor ou textura dos revestimentos, da existência das fontes de calor localizadas ou da coexistência de zonas com diferente resistência térmica.

O aquecimento diferencial pode ocorrer ao longo da espessura de cada pano, provocando eventuais fissuras nas juntas horizontais, arqueamento e perda de estabilidade da parede, no caso de panos exteriores mal apoiados ou insuficientemente grampeados. Na fig. 5.9 ilustram-se algumas situações de dilatação e contracção térmica da parede.

Este fenómeno ao longo da espessura das paredes pode atingir valores significativos em diversos casos, como paredes de fachada com elevada inércia térmica, materiais com baixa condutibilidade térmica, revestimentos de cor escura e ocorrência de insolação prolongada, após longo período de baixa temperatura do ar.

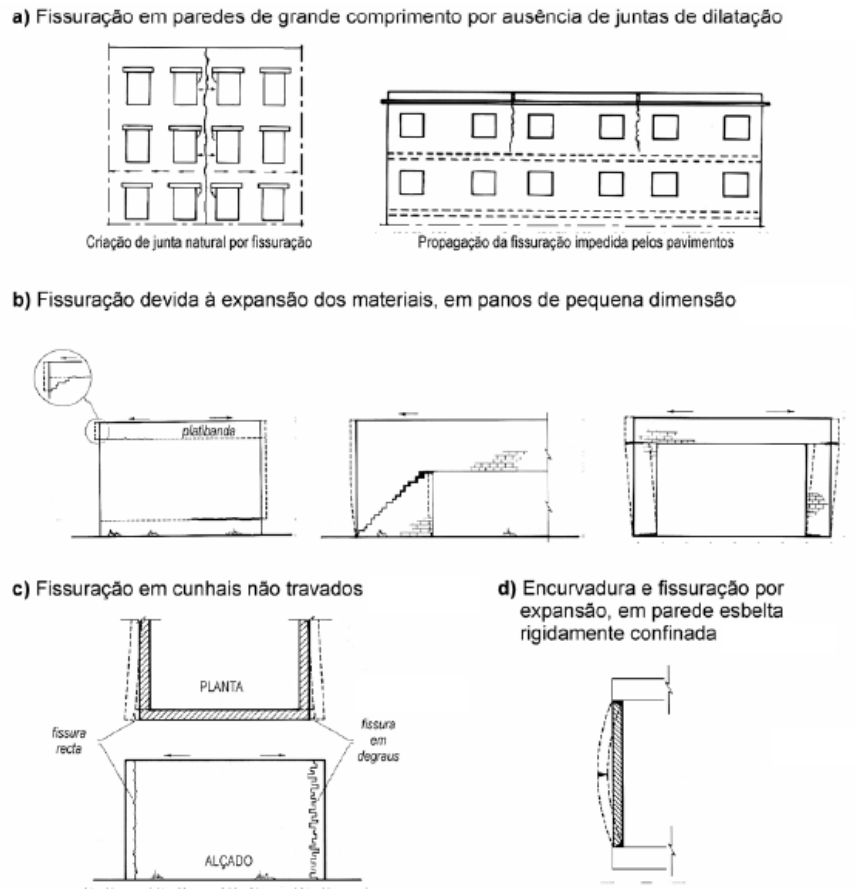


Fig. 5.9 – Fissuração devido a movimentos de origem térmica [55]

As variações de temperatura provocam ainda dilatações e contracções graves nas coberturas de betão armado, devido ao seu elevado coeficiente de dilatação térmica, principalmente quando não dispõe de isolamento térmico ou outra qualquer medida de protecção. Os deslocamentos das coberturas produzem significativos esforços de corte no cimo das paredes, dos quais resulta fissuração nas duas faces da parede, como se constata na fig. 5.10. Este fenómeno ocorre pelo facto da estrutura e elementos subjacentes não acompanharem esses movimentos.

5.5.2. ACÇÃO DA HUMIDADE

A acção da humidade nas paredes é responsável por muitas deficiências funcionais e processos de deterioração. De uma forma indirecta a humidade é responsável por fenómenos de fissuração, nomeadamente quando provoca a expansão do tijolo, a retracção da argamassa e ataques químicos.

As alterações de volume podem ser de natureza reversível ou irreversível. As expansões e contracções irreversíveis estão relacionadas com o período pós-fabrico (expansão das unidades de alvenaria e retracção da argamassa). Estes movimentos irreversíveis podem prolongar-se por vários anos, diminuindo de intensidade até atingir a sua anulação convencional. As unidades de alvenaria cerâmica podem atingir valores de expansão irreversíveis na ordem dos 0,10% e a retracção inicial da argamassa entre 0,04 a 0,10%.

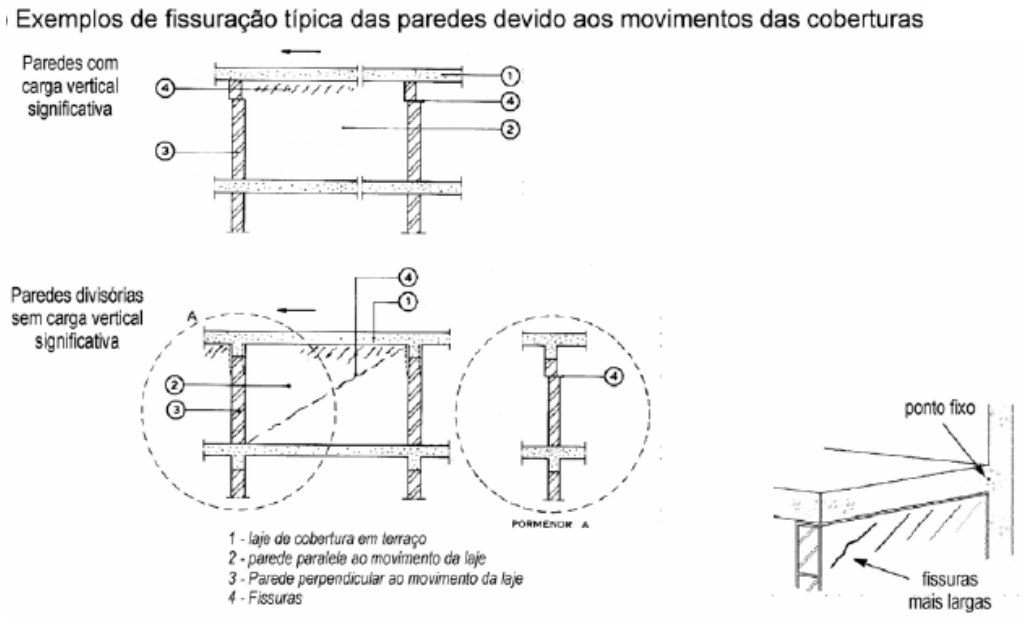


Fig. 5.10 – Movimentos de origem térmica das coberturas [55]

Os movimentos reversíveis dos materiais resultam da variação do seu teor de humidade, que pode ter origem em diversos factores, como no processo de construção, contacto com o terreno, exposição à chuva, entre outras situações.

As unidades de alvenaria e as argamassas hidráulicas, materiais de estrutura porosa, são materiais higroscópicos, isto é, quando colocados em contacto com um ambiente termohigrométrico tendem a absorver ou expulsar uma determinada quantidade de humidade até atingir o equilíbrio de pressões nos seus poros.

Em estruturas porticadas com panos de enchimento de alvenaria, a fissuração induzida surge geralmente a meio das paredes e junto aos pilares, conforme fig. 5.11, observando-se também fissuras em zonas singulares, como cantos de janelas, zonas frágeis ou zonas sujeitas a um aquecimento diferencial, com consequências directas no teor de humidade da parede. Notemos que a fissuração devida à contracção ou expansão desses elementos é muito semelhante quer tenha origem nas variações de temperatura quer tenha origem nas variações do teor de humidade. A distinção é feita, em geral, pela análise do grau de exposição da parede aos dois efeitos.

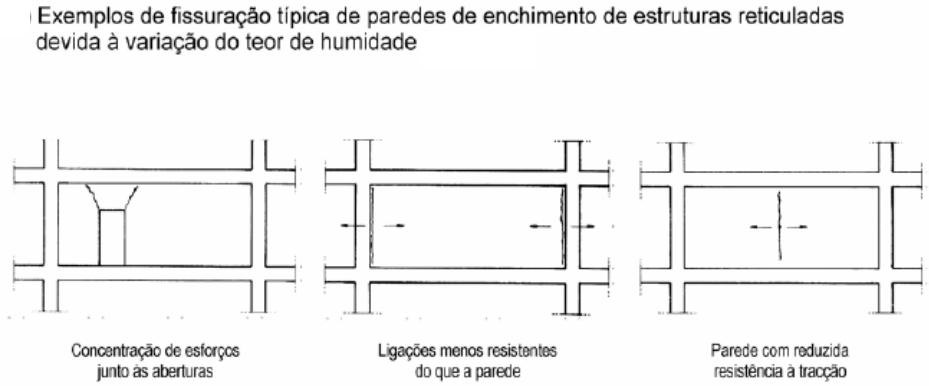


Fig. 5.11 – Fissurações típicas de paredes com origem em movimentos devido à variação do teor de humidade [55]

5.5.3. DEFORMAÇÃO EXCESSIVA DO SUPORTE

Todos os suportes sobrem deformações sob a acção de cargas aplicadas, sendo nos elementos horizontais submetidos a esforços de flexão, que este fenómeno é mais significativo. A deformação excessiva das lajes e pavimentos origina problemas graves ao nível das paredes, incluindo os seus revestimentos, podendo mesmo em último caso criar-se problemas de instabilidade.

A tendência para o aligeiramento e esbelteza das estruturas está relacionada com exigências arquitectónicas, económicas e de capacidade de acomodação de movimentos, sendo apoiada pela evolução das características resistentes dos materiais de construção e pela sofisticação dos métodos de cálculo. Esta tendência originou uma progressiva redução da espessura da zona do apoio do pano exterior da parede alvenaria, um aumento da distância entre pilares e uma redução da espessura das vigas, tornando-se planas, conforme fig. 5.12.

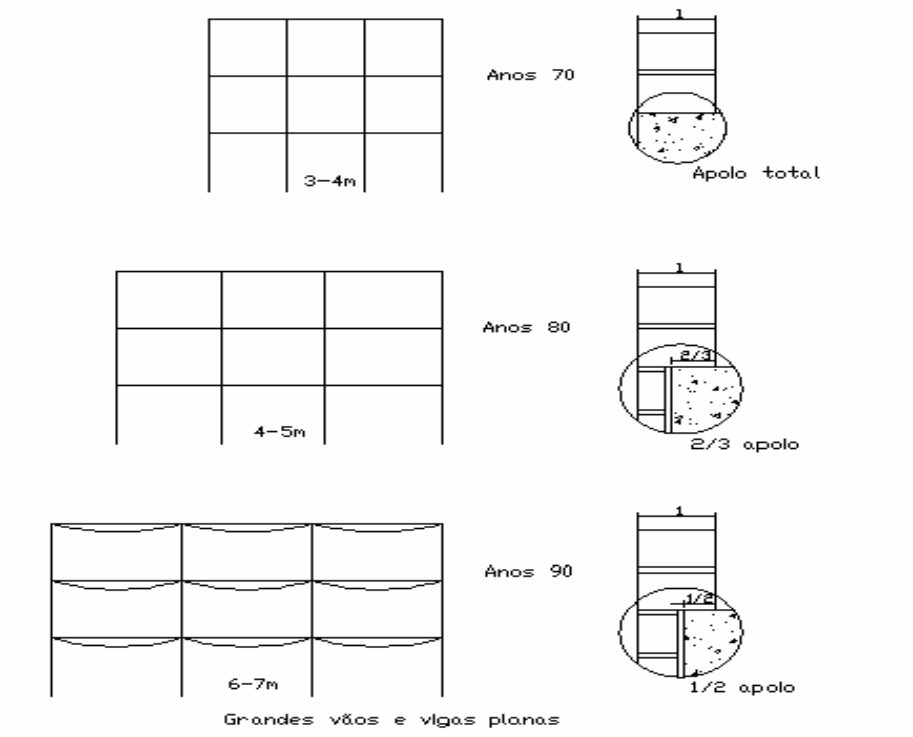


Fig. 5.12 – Evolução da estrutura de betão armado ao longo dos anos

Este tipo de situação levou a uma maior ocorrência de patologias ao nível das paredes de alvenaria, uma vez que a reduzida dimensão da área de suporte é responsável por tensões locais elevadas, deformação excessiva, rotação do pano exterior de fachada e degradação dos revestimentos exteriores [54], tal como se verifica na fig. 5.13.

Em paredes sem aberturas e com comprimento superior à altura, a fissuração por deformação excessiva do suporte pode assumir três configurações típicas, conforme fig. 5.14.

No primeiro caso admite-se que o pavimento inferior se deforma mais do que o pavimento superior, o que provoca uma transferência da carga da parede para as extremidades do apoio, com a formação de um arco de tensão. Esta situação é agravada pela deformação do pavimento superior que, sobretudo na zona central, transmite carga à parede, que não acompanha a sua deformação por flexão.

No segundo caso admite-se que o pavimento superior tem uma deformação maior que o pavimento, o que transforma a parede num elemento portante, com fissuração análoga à duma viga em flexão, isto é com uma fissura vertical central na zona inferior, resultante das tracções horizontais instaladas.

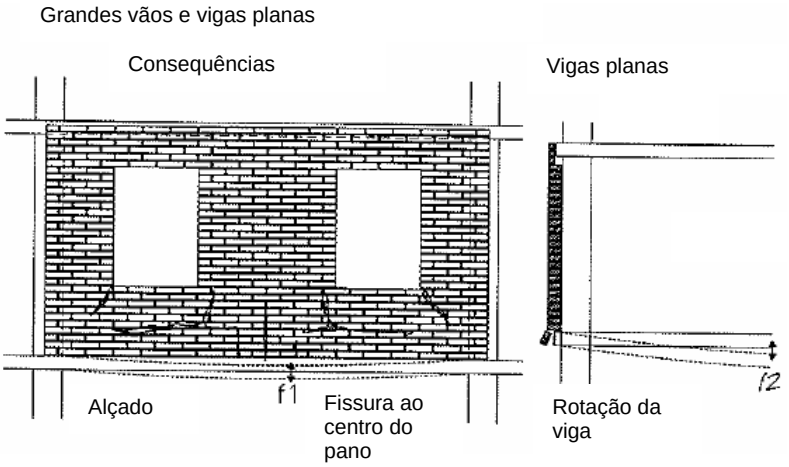


Fig. 5.13 – Fendilhação típica em paredes de alvenaria [54]

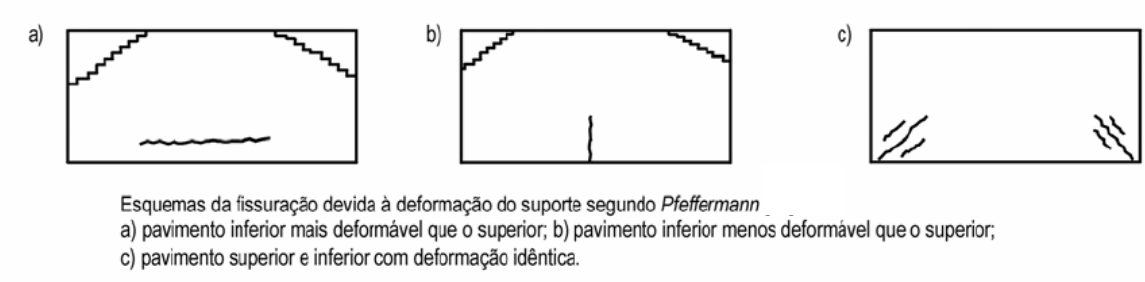


Fig. 5.14– Exemplos de fissuração devido à deformação excessiva do suporte [55]

Quando a deformação é idêntica nos dois pavimentos, como na terceira situação, a parede funciona como se fosse uma viga-parede deficientemente armada e a primeira fissuração ocorrerá, em princípio por corte com propagação a 45º a partir dos apoios.

É corrente realizarem-se edifícios com corpos avançados, ou seja, com paredes apoiadas em elementos estruturais em consola, que atingem níveis de ocorrência alarmantes em Portugal e, frequentemente, graves consequências na estanquidade e estabilidade das paredes.

Esta situação de corpos avançados leva a que, ao nível do pavimento do primeiro piso exista uma flecha elevada e, consequentemente, origina a fissuração dos panos de alvenaria perpendiculares à fachada ou então na zona de ligação dos panos frontais com os laterais, em conformidade com a fig. 5.15.

Em muitos casos, as cargas dos pisos superiores acumulam-se ao nível do primeiro piso do corpo avançado, podendo originar o desequilíbrio desse pano de parede, pelo facto de a carga ser excêntrica [54], de acordo com a fig. 5.15.

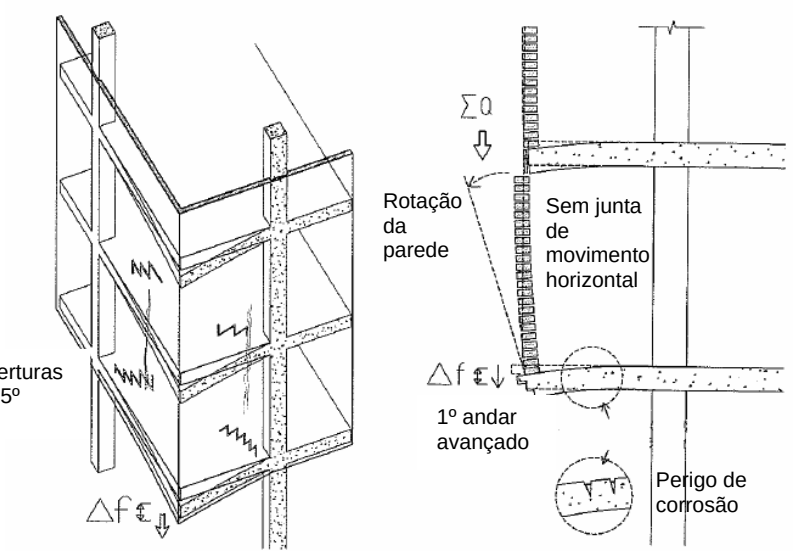


Fig. 5.15 – Tipos de anomalias em edifícios com corpos avançados [54]

É importante salientar que a flecha duma laje avançada não resulta apenas da sua deformada, mas da soma de todas as flechas que estejam a suportar estruturalmente essa laje, conforme fig. 5.16. Assim, a parte avançada arranca sobre uma viga paralela à fachada que por sua vez descarrega, nos seus extremos, em duas vigas perpendiculares à fachada. Esta situação faz com que a deformação dessa laje resulte da soma de três flechas, o que é bastante mais gravoso do que correntemente se considera em projecto, ocorrendo problemas de fissuração e instabilidade nas paredes.

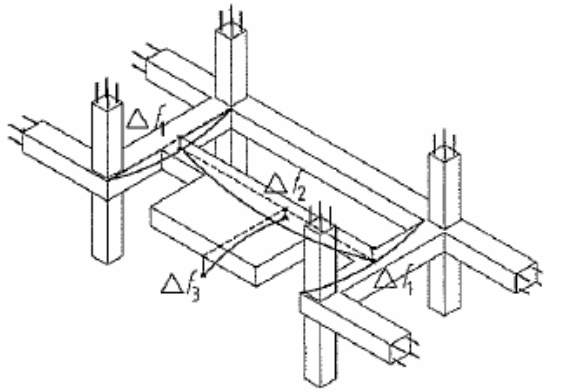


Fig. 5.16 – Somatório de flechas duma zona avançada [54]

Nos projectos actuais, graças às estruturas porticadas de aço e de betão armado, por um lado, e devido à obrigação de disponibilizar na parte inferior dos edifícios estacionamentos, leva a que se utilizem distâncias entre pilares muito elevadas. Esta situação possibilita a deformação do tecto do rés-do-chão no sentido perpendicular ao da fachada, devido a receber as cargas dos pisos superiores, gerando torções nas vigas planas de bordo, que por sua vez originam a instabilidade do pano exterior, conforme a fig. 5.17.

Como na maioria dos casos não se utilizam um número adequado de juntas de movimento, os esforços são transmitidos sucessivamente até à zona do pavimento do primeiro piso. Deste modo, existe uma sobrecarga excessiva nas vigas do tecto do rés-do-chão, criando-se uma flecha evidente dessa laje e,

como consequência, a fissuração vertical dos panos da parte inferior, o que implicitamente origina a instabilidade dessa zona pelo apoio insuficiente das paredes [54], de acordo com a fig. 5.17.

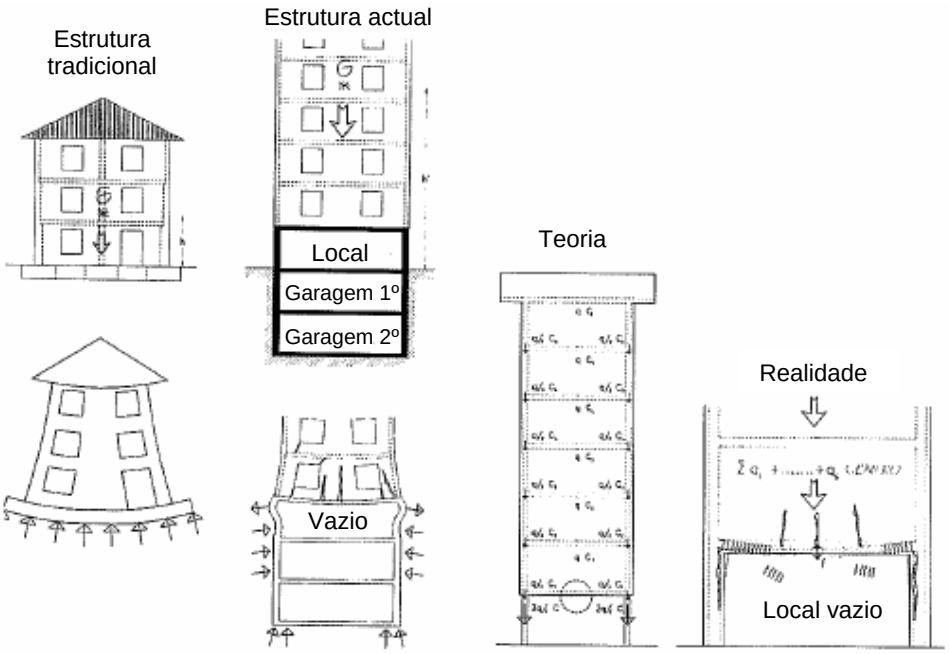


Fig. 5.17 – Deformação e transmissão de cargas típicas num edifício [54]

Com o objectivo de limitar a fissuração e a crescente instabilidade das paredes, é necessário conhecer em fase de projecto vários aspectos:

- limites admissíveis de deformação do suporte;
- previsão da deformação, quer instantânea (logo após a construção), quer a longo prazo (deformação por fluência);
- determinação das características resistentes das paredes e das suas ligações;
- determinação dos esforços gerados nas paredes sob acção da deformação do suporte e da consequente instabilidade e fissuração da parede.

A prevenção para a deformação do suporte deve ser feita tendo em atenção três acções: a limitação das flechas, o aumento da resistência das paredes aos esforços resultantes da deformação do suporte (maior resistência à tracção e ao corte) e adopção de medidas tecnológicas que diminuam a repercussão dos movimentos do suporte nas paredes.

5.5.4. RETRACÇÃO DA ARGAMASSA

Na execução de alvenarias de tijolo devem ser considerados os efeitos dos movimentos irreversíveis dos dois principais elementos envolvidos (argamassa de assentamento e unidades de alvenaria cerâmica) que ocorrem, principalmente nos primeiros anos após o fabrico.

Nas condições de aplicação da argamassa hidráulica tradicionais, sabemos que estas sofrem uma retracção inicial, que se admite decorrer durante os primeiros 28 dias e que resulta de 3 aspectos: a dessecação, a hidratação e a carbonatação.

Numa amassadura corrente, as argamassas apresentam normalmente água em excesso, existindo uma parcela que é desnecessária para as reacções de hidratação do ligante. A saída desta água, dos poros capilares ou dos poros de menor dimensão, é feita por evaporação ou por contacto com outros materiais porosos com menor teor em humidade, que provocam uma perda de massa, acompanhada de uma redução significativa de volume.

É importante salientar que a retracção excessiva das argamassas conduz à rotura ou enfraquecimento da ligação argamassa-tijolo, originando fissuras, com consequências ao nível da resistência global da parede, essencialmente às acções horizontais. A retracção global da argamassa é influenciada pela relação da composição com os seus constituintes: tipo de cimento, tipo de inertes e ainda processo de cura.

Os principais factores que conduzem a um aumento da retracção global da argamassa são:

- relação água/cimento elevada;
- finura do inerte excessiva;
- deficientes condições de cura.

5.5.5. EXPANSÃO IRREVERSÍVEL DAS UNIDADES DE ALVENARIA

As unidades de alvenaria cerâmicas sofrem uma grande variação de volume antes da sua aplicação em obra, pelo que não afectam a construção. Estas variações de volume podem ser de contracção, resultante do arrefecimento após fabrico, ou de expansão, resultante da absorção de água da atmosfera, até atingir o seu ponto de equilíbrio.

No entanto, estas unidades de alvenaria apresentam outra parcela de expansão, de natureza irreversível, que se pode prolongar no tempo. Este fenómeno resulta da absorção de moléculas de água essencialmente em unidades com uma cozedura deficiente.

Quando a expansão irreversível ocorre de forma significativa após a construção da parede, podem surgir problemas de fissuração, devido à compressão excessiva a que a parede está sujeita devido a elementos construtivos confinantes, como é o caso da estrutura de betão armado, como representado na fig. 5.18.

As medidas mais eficazes são sem dúvida as preventivas, por forma a evitar que o aparecimento deste tipo de situações, devendo proceder-se a um maior controlo do processo de fabrico (com redução da expansão).

5.5.6. RETRACÇÃO E EXPANSÃO HIGROTÉRMICA DOS MATERIAIS

Uma das acções que tem repercussões com a expansão e retracção das paredes de alvenaria é a acção térmica que consoante o grau de restrição a que os materiais e elementos construtivos estejam sujeitos podem provocar maiores ou menores tensões.

Os movimentos sofridos por um material homogéneo sujeito a uma variação de temperatura ΔT, são dados pela seguinte expressão:

$$R = \alpha * l * \Delta T \qquad (5.1)$$

em que:

R – expansão ou contracção total da parede na direcção considerada (mm);
l – dimensão na direcção da expansão ou contracção (mm);

ΔT – variação de temperatura da parede (K);
α – coeficiente de dilatação térmica linear da alvenaria (m/(m.K)).

A escolha dos materiais para alvenaria e a sua utilização deveria ter em consideração as diversas acções a que estes estão sujeitos, nomeadamente as acções de temperatura e outros efeitos climatéricos. O coeficiente de dilatação térmica linear de uma parede varia em função do material de enchimento utilizado, de acordo com o EC6: Part 1-1 [6]. Assim, esse regulamento define que para unidades de alvenaria cerâmicas esse coeficiente situa-se entre 4 a $8x10^{-6}$ /K, e no caso de unidades de betão o coeficiente de dilatação térmica varia entre 6 a $12x10^{-6}$ /K.

Nos materiais homogéneos, os movimentos de origem térmica são, em geral, reversíveis. Nos elementos construtivos, em particular nos que são constituídos por diferentes materiais, estes movimentos podem ser reversíveis ou irreversíveis. Os movimentos são irreversíveis quando se esgota a capacidade resistente dos materiais ou da ligação.

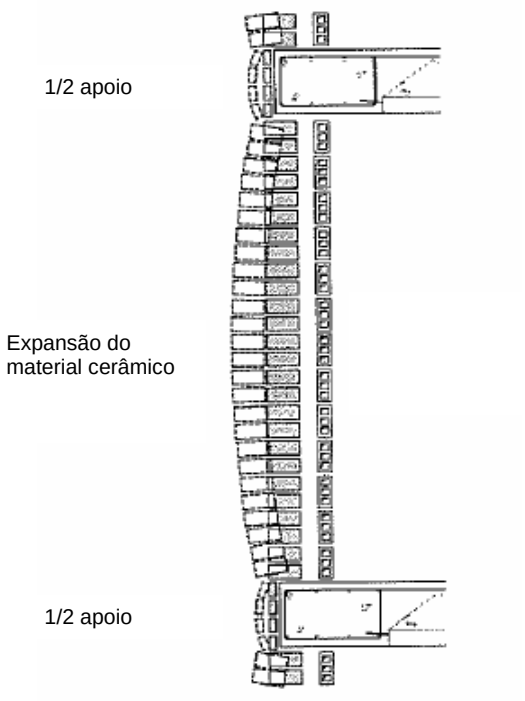


Fig. 5.18 – Efeitos da expansão irreversível das unidades de alvenaria [54]

5.5.7. DISTÂNCIA ENTRE JUNTAS DE DILATAÇÃO

Como foi referido anteriormente, as juntas de dilatação são importantes para absorverem possíveis movimentos da parede, sem causar anomalias. Assim, uma distância elevada entre juntas de dilatação ou a ausência destas são muito frequentes na construção em Portugal.

Deste modo, as distâncias entre juntas na ordem dos 40 a 50 m originam aberturas de fissuras nas paredes de alvenaria.

É aconselhável dispor-se juntas de dilatação verticais em cada 12 m, no caso de climas continentais e 16 m, no caso de climas marítimos. Se a parede de alvenaria for armada pode aumentar-se substancialmente essas distâncias para os 30 ou 35 m, conforme a fig. 5.19.

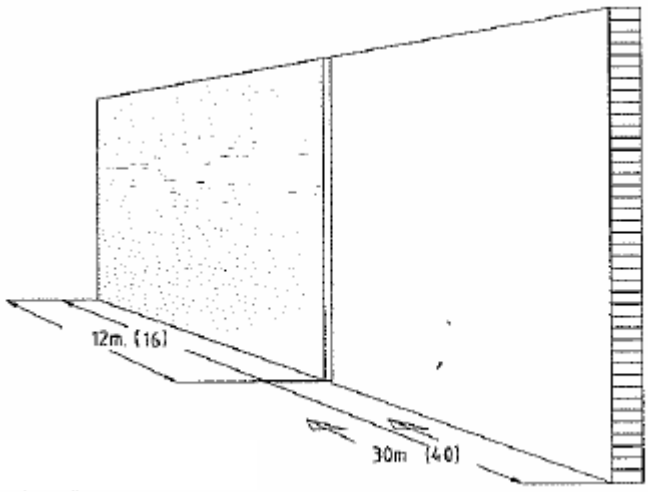


Fig. 5.19 – Separação recomendada para as juntas de dilatação [54]

5.6. CONSEQUÊNCIAS TECNOLÓGICAS

A solução construtiva utilizada frequentemente gera o aparecimento de pontes térmicas, ou seja, uma perda de calor mais acentuada por essa zona, normalmente nós estruturais em particular nos topos de laje (nó parede-laje). No entanto, o RCCTE [21] sugere o reforço da resistência térmica nestes pontos singulares, e por forma a respeitar as disposições regulamentares pode-se recorrer a uma correcção simples ou dupla através do apoio parcial do pano exterior da parede sobre a laje.

Estas soluções de correcção, associadas ao nosso método tradicional de construção de fachadas, têm conduzido a problemas, tais como a fissuração das paredes e a criação de condições de instabilidade. Este tipo de patologias é consequência da progressiva redução da espessura e limitação dos apoios das paredes exteriores ao longo do tempo.

Assim, e para responder às crescentes exigências de conforto higrotérmico, que estão intimamente ligadas às preocupações com o consumo de energia e protecção ambiental, é necessário isolar termicamente a envolvente dos edifícios, de modo a minimizar as trocas de calor com o exterior, com consequente redução das necessidades de aquecimento/arrefecimento e diminuição dos riscos de ocorrência de condensações.

Têm sido desenvolvidos diversos sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior que são de utilização corrente em diversos países europeus, quer na reabilitação de edifícios cuja envolvente vertical apresente índices de isolamento térmico insatisfatórios, infiltrações ou aspecto degradado, quer em construções novas. Estes sistemas constituem uma óptima solução, tanto do ponto de vista energético como do ponto de vista construtivo.

É possível distinguir dois tipos de sistemas distintos com isolamento pelo exterior:

- sistema bardage, isolamento térmico pelo exterior sob placas rígidas de revestimento, com caixa de ar, conforme fig. 5.20;
- revestimento sintético delgado armado sobre isolamento térmico (ETICS), conforme fig. 5.21.

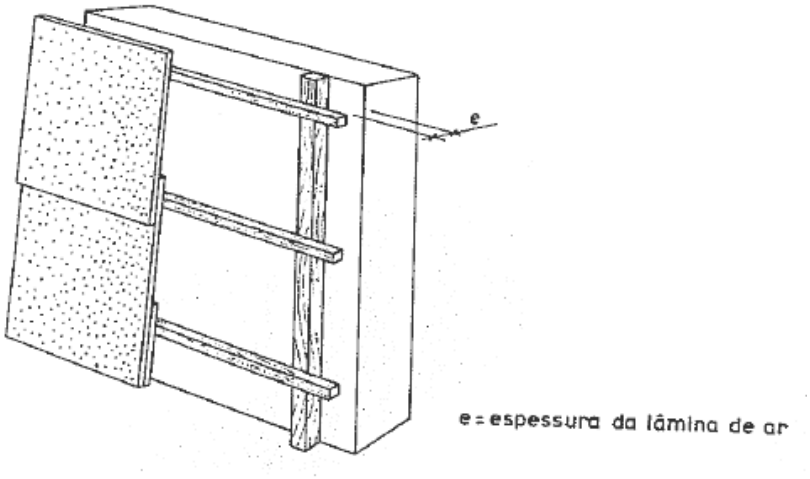


Fig. 5.20 – Soluções de isolamento térmico pelo exterior sob placas rígidas de revestimento

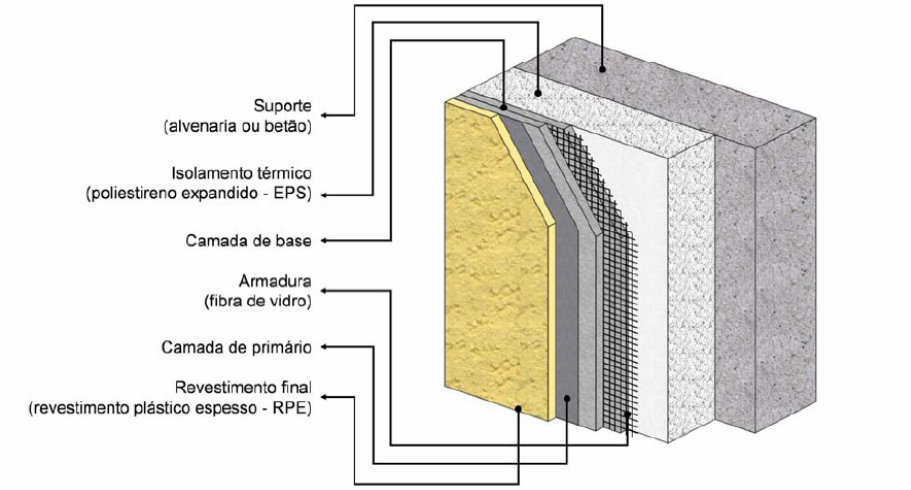


Fig. 5.21 – Soluções de isolamento térmico pelo exterior – sistema ETICS

O isolamento térmico pelo exterior é reconhecido como uma solução técnica que traz grandes vantagens para a envolvente dos edifícios, tais como:

- redução das pontes térmicas, o que se traduz por uma menor espessura de isolamento térmico para obtenção de um mesmo coeficiente de transmissão térmica global da envolvente;
- diminuição dos riscos de condensações;
- diminuição da espessura das paredes exteriores com consequente aumento das áreas habitáveis;
- redução do peso das paredes e das cargas permanentes sobre a estrutura;
- aumento da protecção conferida ao tosco das paredes face às solicitações dos agentes atmosféricos;
- diminuição do gradiente de temperaturas a que são sujeitas as camadas interiores das paredes.

6

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE POR RECURSO A PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

6.1. GENERALIDADES

Neste Capítulo pretende-se fazer uma análise exploratória preliminar do estudo de tensão induzido nas paredes de alvenaria, pelo diferencial de temperatura entre o interior e o exterior. Pretende-se avaliar se o facto de existir um diferencial provoca tensões nas paredes que possam explicar algumas anomalias que se verificam na nossa construção actual. Estes efeitos são influenciados por muitas variáveis, como a constituição e geometria da parede e da estrutura onde se insere, condições climatéricas no momento de construção da parede, gradiente de temperatura entre o interior e o exterior da construção e a sua variação ao longo do ano. Esta análise foi efectuada com base numa simulação numérica do comportamento térmico das paredes de alvenaria, recorrendo-se ao método dos elementos finitos. Utilizou-se o programa disponível na FEUP – *ABAQUS*, cujas características se consideraram adequadas para o fim em vista.

A simulação numérica visou avaliar a influência dos principais factores que condicionam o comportamento térmico das paredes de alvenarias, fazendo-se variar alguns aspectos considerados importantes, como a solução corrente de parede, a condutibilidade térmica do material, o coeficiente de transmissão térmica da parede e gradiente de temperatura. A análise foi fundamentalmente a três dimensões (3D).

Ao longo deste Capítulo, além da descrição e caracterização do programa e dos pressupostos de análise, apresentam-se os resultados da simulação.

6.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO

6.2.1. CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

Na simulação numérica utilizou-se o programa de elementos finitos *ABAQUS* (versão 6.4), constituído por um pré-processador interactivo que controla todo o programa, um processador e um pós-processador. Dispõe ainda de um módulo de pré-processamento alternativo por recurso a *CAD*.

O pré-processamento permite de uma forma interactiva desenvolver a geometria do modelo, malha condições fronteira e submeter o modelo ao processamento.

O acesso ao pós-processamento pode ser efectuado em qualquer altura para verificação dos dados. Após o processamento permite a exibição gráfica dos resultados, através do recurso a palete de cores para interpretação dos deslocamentos, tensões e temperaturas.

Este programa permite tratar problemas térmicos e mecânicos em regime permanente e variável, obter as tensões induzidas por fenómenos térmicos, e ainda estudar problemas em que as propriedades dos materiais não sejam isotrópicas.

6.2.2. ENTRADA DE DADOS E SAÍDA DE RESULTADOS

6.2.2.1. Entrada de dados

A simulação numérica do comportamento térmico das paredes de alvenaria por recurso ao programa *ABAQUS* requer a definição geométrica do modelo e da malha respectiva. O programa permite efectuar essa definição de forma simples e interactiva.

A sequência de introdução de dados é a seguinte:

- definição das características geométricas dos elementos;
- definição das características físicas dos elementos;
- definição de um grupo de elementos;
- definição das condições fronteira;
- geração da malha para esse grupo de elementos;
- processamento.

A geração da geometria dos elementos e malhas é facilitada pela existência de múltiplas possibilidades e ferramentas pré-definidas que simplificam essa fase do trabalho.

Conforme já foi referido as características geométricas e propriedades físicas são função do tipo de elemento e do tipo de problema em análise.

No caso da análise térmica simulada a sequência de introdução de dados foi a enunciada anteriormente.

6.2.2.2. Saída de resultados

Alguns dos resultados da simulação que podem ser apresentados de forma gráfica são:

- temperatura nos nós;
- fluxo de calor através da parede de alvenaria;
- componentes das tensões nos nós;
- deslocamento espacial dos nós;
- reacções nos nós.

No caso da análise efectuada utilizaram-se os seguintes resultados gráficos:

- temperatura nos nós;
- componentes das tensões nos nós;
- deslocamento espacial dos nós.

6.3. PRESSUPOSTOS DE ANÁLISE

6.3.1. ENQUADRAMENTO

Uma vez que o coeficiente de transmissão térmica da parede, *U*, é o parâmetro que melhor caracteriza o comportamento térmico das paredes que realizam a envolvente dos edifícios, os regulamentos em vigor fixam o seu valor máximo, em função das características da zona onde se localiza a construção.

No caso da regulamentação portuguesa, RCCTE [21], a apresentação dos valores de referência e máximo do coeficiente de transmissão térmica, *U*, foi efectuada para as três zonas climáticas de Inverno em que o país se divide, de acordo com o Quadro 2.17. Este parâmetro é imprescindível para a quantificação das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento, sob o ponto de vista de conforto de Inverno ou de Verão, respectivamente.

Por esse facto, considerou-se que para a análise da influência da variação de temperatura, este parâmetro seria um dos mais condicionantes para a definição das características físicas da parede de alvenaria, que será simulada em regime permanente e em condições estacionárias de temperatura interior e exterior. Subsiste, no entanto, o facto de a parede não ser apenas constituída por elementos principais (unidades de alvenaria cerâmicas ou de betão), mas também por elementos complementares, cuja existência deve ser considerada. Esses elementos são as juntas horizontais e/ou verticais que aglutinam os elementos, os revestimentos de um ou de ambos os lados da parede que lhe dão um aspecto acabado, a estrutura de betão armado e ainda outros elementos como o isolamento térmico. Outro aspecto ainda a considerar é o facto de estes elementos se poderem combinar de várias formas, fazendo crescer o número de soluções alternativas.

Nesta análise achou-se conveniente simplificar a análise, considerando a parede de alvenaria homogénea, com um módulo de elasticidade equivalente, ou seja, que entra em consideração com as unidades de alvenaria cerâmicas e as juntas de argamassa.

6.3.2. CONDIÇÕES FRONTEIRA

6.3.2.1. Definição dos limites da zona a analisar

De acordo com o expresso anteriormente, optou-se por considerar como limites da zona a modelar o volume associado às dimensões de coordenação da parede de alvenaria, isto é, as dimensões da parede de alvenaria, acrescida das lajes de piso superior e inferior, dos pilares laterais e de metade da dimensão da parede de alvenaria em todas as direcções. Estes limites permitem fazer variar os aspectos considerados relevantes nesta análise simplificada. Na figura 6.1. apresenta-se um alçado estilizado que ilustra a zona objecto de análise.

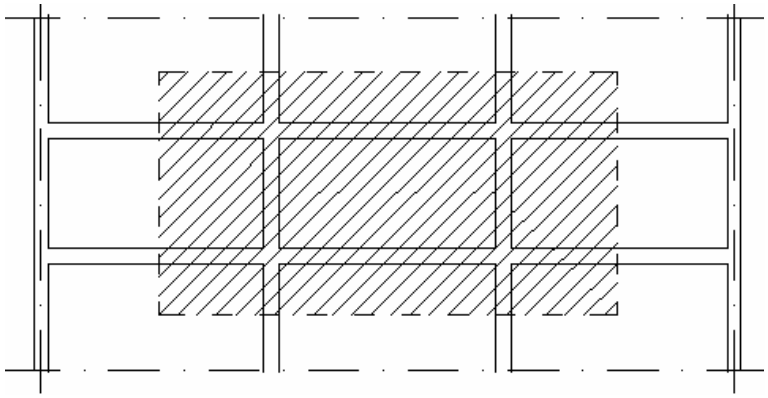


Fig.6.1 – Alçado da parede de alvenaria a simular

6.3.2.2. Temperaturas

Na análise em questão impuseram-se temperaturas ambiente em regime estacionário, por forma a simular três situações diferentes:

- 1ª situação: temperatura interior 25 ºC e temperatura exterior 5 ºC;
- 2ª situação: temperatura interior 10 ºC e temperatura exterior -10 ºC;
- 3ª situação: temperatura interior 20 ºC e temperatura exterior 40 ºC;

Na hipótese 25 ºC e 5 ºC pretendeu-se analisar uma situação corrente na construção em Portugal durante o Inverno, por forma a verificar numa situação real qual a influência dessa variação nas paredes exteriores de alvenaria. É importante salientar que inicialmente o estado de tensão da parede é nulo, desta forma ao colocar-se a parede de alvenaria a uma temperatura interior de 25 ºC e exterior de 5 ºC, está-se a induzir um acréscimo de temperatura de 15 ºC em média, ou seja, passa a estar sujeita a um estado de tensão superior.

No caso da hipótese de 10 ºC e -10 ºC considerou-se também um gradiente de 20ºC, não sendo uma situação de temperaturas tão correntes no nosso país. Com esta situação pretendeu-se analisar o que ocorreria quando a parede não está sujeita a nenhum estado de tensão, uma vez que este diferencial de temperatura não introduz qualquer efeito na parede, ou seja, a parede não se encontra em expansão.

Na hipótese 20 ºC e 40 ºC pretendeu-se analisar uma situação típica de Verão, avaliando desta forma o facto de a parede se encontrar sujeita a uma temperatura superior na face exterior.

6.3.2.3. Ligações nas condições fronteira

As ligações nos limites definidos para a zona a modelar devem transcrever o mais aproximadamente possível a realidade. Assim, devido à existência de continuidade lateral e superiormente, impediu-se o deslocamento da parede para a lateral e na vertical. O deslocamento lateral foi impedido, uma vez que se admitiu que a parede tinha dimensões tais que esse deslocamento era desprezado.

Na simulação considerou-se ainda que a estrutura estava impedida de se deslocar para o exterior, ou seja, podendo apenas a parede ter esse deslocamento dado não lhe ter sido impedido.

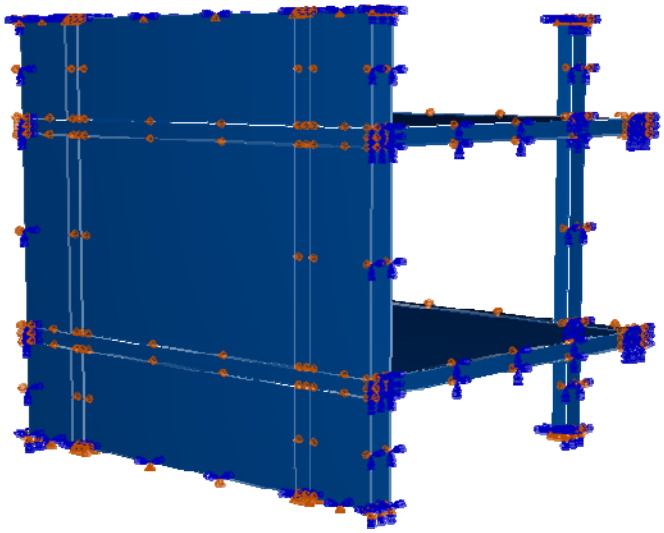


Fig.6.2 – Restrições de apoio

6.3.2.4. Resistências térmicas superficiais

As resistências térmicas superficiais adoptadas foram baseadas num dos documentos publicados pelo LNEC, o ITE 50 [29]. Assim, com base nessa publicação utilizaram-se os seguintes valores:

- resistência térmica superficial interior da parede – $1/hi = 0{,}13$ (m^2.ºC)/W;
- resistência térmica superficial exterior da parede – $1/he = 0{,}04$ (m^2.ºC)/W.

6.3.3. GEOMETRIA DAS PAREDES DE ALVENARIA

Neste estudo foi efectuada uma análise tridimensional de algumas soluções correntes de parede que são utilizadas frequentemente em Portugal, como é o caso da parede simples, da parede simples com isolamento pelo exterior e da parede dupla, conforme o esquema da fig. 6.3. Na análise efectuada não se considerou a existência dos rebocos interior e exterior, para simplificar a análise e por se considerar que poderão não influenciar demasiadamente os resultados sob o ponto de vista mecânico.

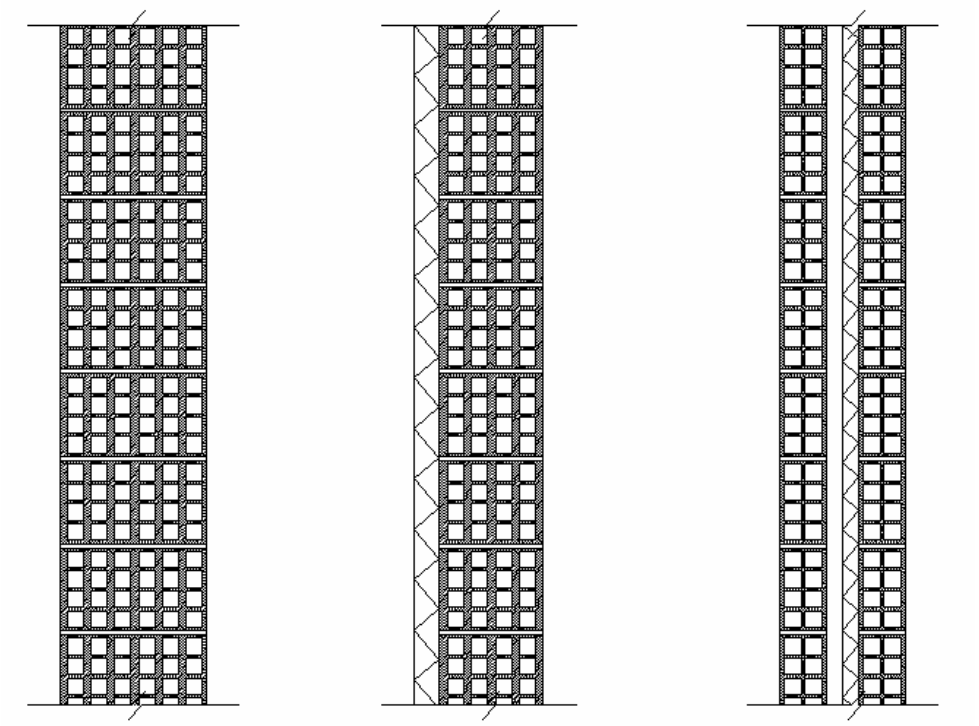
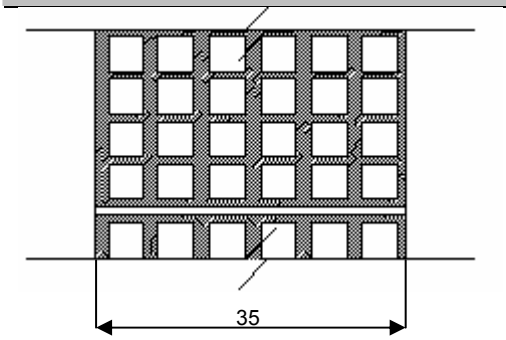
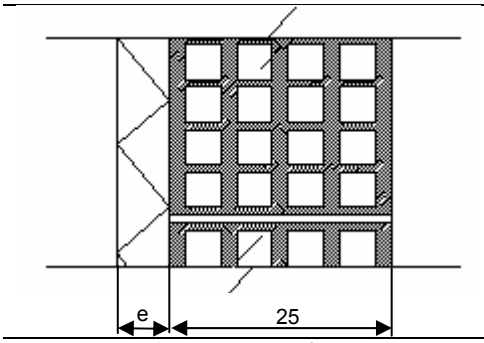
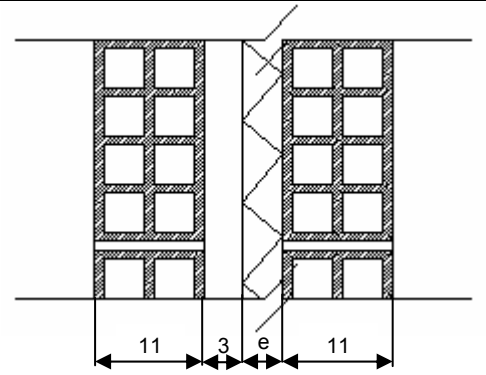


Fig.6.3 – Soluções correntes de parede: parede simples, parede simples com isolamento pelo exterior e parede dupla

Para se analisar concretamente a influência das variações de temperatura no desempenho das fachadas procedeu-se a um estudo com as soluções definidas atrás, mas com coeficientes de transmissão térmica diferentes. Numa primeira fase adoptou-se um coeficiente de transmissão térmica, *U*, de 0,5 W/(m^2.ºC). Este valor foi retirado do RCCTE [21], conforme o Quadro 2.17, como sendo o valor mais exigente. Numa segunda fase procedeu-se à alteração do coeficiente de transmissão térmica, para um valor menos exigente, na ordem de 1,0 W/(m^2.ºC).

Para se conseguir obter estes valores do coeficiente de transmissão térmica procedeu-se a alterações na constituição das soluções de parede analisadas que se encontram definidas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Variáveis nas soluções para se obter diferentes coeficientes de transmissão térmica

Solução de parede	Variáveis
	U = 0,5 W/(m^2.ºC) ⟶ λ = 0,195 W/(m.ºC)
	U = 1,0 W/(m^2.ºC) ⟶ λ = 0,438 W/(m.ºC)
	U = 0,5 W/(m^2.ºC) ⟶ e = 6 cm
	U = 1,0 W/(m^2.ºC) ⟶ e = 1 cm
	U = 0,5 W/(m^2.ºC) ⟶ e = 6 cm
	U = 1,0 W/(m^2.ºC) ⟶ e = 0 cm (sem isolamento térmico)

Com esta alteração do coeficiente de transmissão térmica pretendeu-se analisar as variações dos resultados com a passagem de um maior fluxo através da parede, ou seja, quando a perda de calor é mais elevada.

É importante salientar que na segunda etapa, com um U=1,0 W/(m^2.ºC), na situação de parede simples com isolamento pelo exterior, a utilização de uma espessura de 1 cm de isolamento térmico não faz muito sentido no sistema ETICS, uma vez que essa camada não permite uma diminuição significativa das perdas térmicas através da parede, que é um dos principais objectivos ao se utilizar este tipo de solução. Desta forma, esta simulação serviu apenas para analisar o que realmente ocorre quando se diminui o coeficiente de transmissão térmica numa parede deste tipo, conseguido apenas com a diminuição da espessura do isolamento térmico.

6.3.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ADMITIDAS PARA OS MATERIAIS

Quanto às características dos materiais adoptados, o material cerâmico e o betão são considerados como materiais frágeis, isotrópicos e homogéneos com comportamento elástico-linear. As características destes materiais foram adoptadas com base nos valores mais correntes utilizados em Portugal.

Como já foi referido anteriormente nesta análise optou-se por homogeneizar a parede considerando-a com características equivalentes, ou seja, não se consideraram elementos de junta.

No Quadro 6.2 encontram-se definidas as características elásticas dos materiais adoptados na simulação.

Quadro 6.2 – Valores das características elásticas dos materiais utilizados na análise numérica

Material	Situação de parede simples	Situação de parede simples com isolamento pelo exterior	Situação de parede dupla
Alvenaria	E=1,6 GPa ν =0,2 α=6x10^{-6} /K λ=0,195 W/(mºC)	E=1,6 GPa ν =0,2 α=6x10^{-6} /K λ=0,446 W/(mºC)	E=1,6 GPa ν =0,2 α=6x10^{-6} /K λ=0,407 W/(mºC)
Betão	E=20 GPa ν =0,2 α=9x10^{-6} /K λ=1,65 W/(mºC)	E=20 GPa ν =0,2 α=9x10^{-6} /K λ=1,65 W/(mºC)	E=20 GPa ν =0,2 α=9x10^{-6} /K λ=1,65 W/(mºC)
Isolamento térmico	-	λ=0,045 W/(m.ºC)	λ=0,045 W/(m.ºC)

6.3.5. TIPO DE ELEMENTO FINITO E NÍVEL DE DISCRETIZAÇÃO

O elemento finito utilizado e escolhido para esta análise foi o C3D8T (elemento térmico de 8 nós), atendendo a que estamos numa análise tridimensional.

Uma vez criados os macro-elementos, o modelo foi discretizado através de uma malha de elementos finitos que, após sucessivos refinamentos, foi aceite como válida para a obtenção de resultados satisfatórios.

6.4. IDENTIFICAÇÃO DAS ALVENARIAS ANALISADAS

Conforme referido anteriormente, na análise numérica efectuada pretende-se analisar a influência da variação de temperatura no desempenho das paredes de alvenaria, fazendo variar algumas condições na estrutura. Para todos os tipos de paredes simuladas foram efectuadas as mesmas simulações para ser possível comparar os seguintes resultados:

- distribuição de tensões;
- distribuição da temperatura;
- deslocamentos.

Nestas simulações consideraram-se duas ligações diferentes entre os materiais (estrutura de betão e parede de alvenaria), uma vez que na realidade não se conhece o tipo de ligação existente, conforme ilustra a fig. 6.4. Assim, admitiu-se uma ligação rígida, em que os materiais se encontravam perfeitamente ligados, movendo-se juntamente e uma segunda ligação que permitia o deslizamento

entre os dois materiais, o que significa que os materiais se podiam deslocar separadamente na zona de ligação. Na maior parte das simulações adoptou-se a ligação rígida, sendo a outra ligação utilizada em apenas em dois casos, para simplificar a análise.

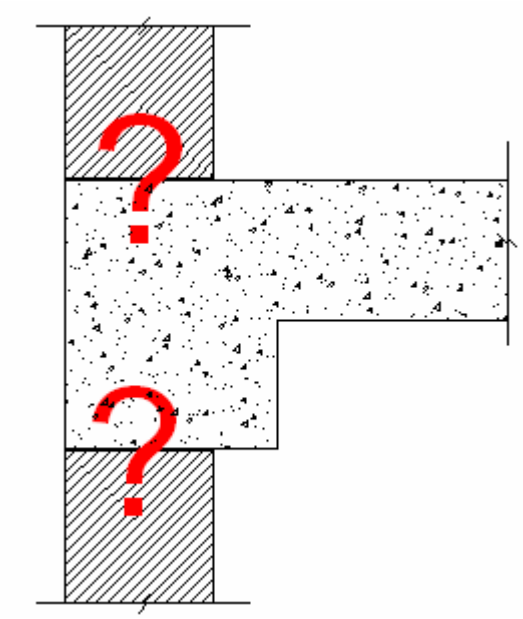


Fig.6.4 – Esquema que ilustra a dificuldade de ligação dos dois materiais

No Quadro 6.3 pretende-se ilustrar as variáveis adoptadas nas várias simulações que se realizaram, considerando como simulação de referência a primeira. Assim, no Quadro 6.3 apresentam-se as características definidas como base para a situação 1, e para as restantes situações identificam-se apenas os parâmetros que foram alterados relativamente à situação de referência.

Quadro 6.3 – Variáveis nas simulações

Simulações	Coeficiente de transmissão térmica, U (W/(m^2.ºC)	Distância entre pilares (m)	T_i e T_e (ºC)	Tipo de ligação entre materiais
1	0,5	4	T_i=25ºC T_e=5ºC	Rígida
2	1,0	-	-	-
3	-	6	-	-
4	-	8	-	-
5	-	-	T_i=20ºC T_e=40ºC	-
6	-	-	-	Deslizamento
7	-	-	T_i=20ºC T_e=40ºC	Deslizamento
8	-	-	T_i=10ºC T_e=-10ºC	-
9	1,0	-	T_i=10ºC T_e=-10ºC	-

Com base no Quadro 6.3 é possível explicar as alterações efectuadas, considerando na primeira simulação um coeficiente de transmissão térmica de 0,5 W/(m^2.ºC), uma distância entre pilares de 4 m, uma temperatura interior de 25 ºC e exterior de 5 ºC e uma ligação rígida entre materiais (estrutura de betão e parede de alvenaria).

Na segunda simulação apenas se procedeu à alteração do coeficiente de transmissão térmica, relativamente à simulação anterior, passando a ter um valor de 1,0 W/(m^2.ºC).

Na terceira e quarta simulações optou-se por alterar face à primeira simulação a distância entre pilares, para 6 e 8 m, respectivamente, mantendo-se as restantes variáveis iguais.

A quinta simulação representa uma situação típica de Verão, ou seja, procedeu-se a uma alteração das temperaturas em relação à situação de referência, passando a temperatura exterior a ser de 40 ºC e a interior de 20 ºC.

Na sexta simulação a variável alterada diz respeito à ligação entre materiais, considerando que a ligação permite o deslizamento entre os dois, mantendo-se as restantes características iguais à primeira simulação.

Na sétima simulação as alterações efectuadas foram duas, uma foi a ligação entre materiais, como na simulação anterior, e a outra foi o valor do coeficiente de transmissão térmica, que passou a ser o menos exigente, com um valor de 1,0 W/(m^2.ºC).

Na oitava simulação a variável alterada face à primeira diz respeito à temperatura do ambiente interior e exterior, em que nesta simulação se optou por considerar uma temperatura interior de 10 ºC e uma temperatura exterior de -10 ºC, mantendo-se as restantes características.

Na nona simulação procedeu-se a duas alterações em relação à situação de referência, uma vez que se mantiveram as temperaturas da simulação anterior e modificou-se o valor do coeficiente de transmissão térmica para 1,0 W/(m^2.ºC).

Estas alterações foram efectuadas para as três soluções de parede em análise, parede simples, parede simples com isolamento pelo exterior e parede dupla, encontrando-se a informação descrita sintetizada no Quadro 6.4.

6.5. LIMITAÇÕES DA ANÁLISE

A análise apresenta algumas limitações, uma vez que não se transpôs para as simulações efectuadas o que se passa na realidade. Assim, foi considerado um regime permanente de variação de temperatura, ou seja, uma temperatura interior e exterior constante, o que na realidade não ocorre, uma vez que as temperaturas ao longo do dia variam. Tal facto poderá criar situações mais gravosas nas paredes de alvenaria.

Outra limitação da análise efectuada refere-se à ligação definida entre a estrutura de betão e a parede de alvenaria, dado não se conhecer com muito pormenor a interacção entre esses materiais. Como já foi referido optou-se por considerar dois casos de ligação distintos, um em que se considera uma ligação perfeita entre os dois materiais e outro em que se considera a possibilidade de deslizamento entre as duas superfícies. Na realidade o que acontece poderá ser uma situação intermédia, mas que no presente trabalho não foi abordada, ficando esta análise mais aprofundada para um trabalho futuro, pois há necessidade de criar uma ligação adequada que demonstre realmente o que se passa entre esses materiais, tornando assim a análise mais verosímil.

Quadro 6.4 – Lista de simulações realizadas

Situação de parede	Identificação da simulação	Coeficiente de transmissão térmica, U ($W/(m^2.ºC)$)	Distância entre pilares (m)	T_i e T_e (ºC)	Tipo de ligação entre materiais
Parede simples	SA1	0,5	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SA2	1,0	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SA3	0,5	6	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SA4	0,5	8	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SA5	0,5	4	T_i=20 ºC; T_e=40 ºC	Rígida
	SA6	0,5	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Deslizamento
	SA7	0,5	4	T_i=20 ºC; T_e=40 ºC	Deslizamento
	SA8	0,5	4	T_i=10 ºC; T_e=-10 ºC	Rígida
	SA9	1,0	4	T_i=10 ºC; T_e=-10 ºC	Rígida
Parede simples com isolamento pelo exterior	SB1	0,5	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SB2	1,0	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SB3	0,5	6	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SB4	0,5	8	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SB5	0,5	4	T_i=20 ºC; T_e=40 ºC	Rígida
	SB6	0,5	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Deslizamento
	SB7	0,5	4	T_i=20 ºC; T_e=40 ºC	Deslizamento
	SB8	0,5	4	T_i=10 ºC; T_e=-10 ºC	Rígida
	SB9	1,0	4	T_i=10 ºC; T_e=-10 ºC	Rígida
Parede dupla	SC1	0,5	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SC2	1,0	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SC3	0,5	6	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SC4	0,5	8	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Rígida
	SC5	0,5	4	T_i=20 ºC; T_e=40 ºC	Rígida
	SC6	0,5	4	T_i=25 ºC; T_e=5 ºC	Deslizamento
	SC7	0,5	4	T_i=20 ºC; T_e=40 ºC	Deslizamento
	SC8	0,5	4	T_i=10 ºC; T_e=-10 ºC	Rígida
	SC9	1,0	4	T_i=10 ºC; T_e=-10 ºC	Rígida

6.6. CRITÉRIOS DE ROTURA

6.6.1. DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO DE ROTURA

Os materiais frágeis, como é o caso do tijolo e da argamassa rompem sem praticamente sofrer deformação plástica. Para prever a rotura destes materiais, o critério que melhor se aproxima do comportamento observado é o critério de Mohr-Coulomb, que se baseia na chamada curva de resistência intrínseca do material. Esta curva define-se como a envolvente das circunferências de Mohr das tensões principais máximas e mínimas (σ_1 e σ_3) dos estados de tensão que provocam a rotura do material, conforme fig. 6.5.

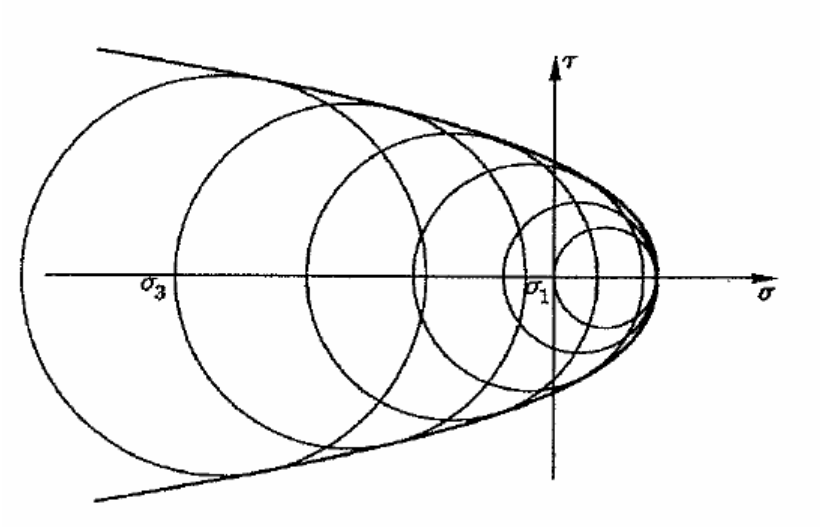


Fig.6.5 – Curva de resistência intrínseca de um material frágil [51]

A partir desta curva intrínseca do material verifica-se para qualquer estado de tensão, se provoca ou não a rotura, traçando as tensões principais máximas e mínimas. Como simplificação, admitiu-se que a curva intrínseca pode ser aproximada a partir de duas rectas.

Para um determinado estado de tensão ao qual corresponde uma circunferência obtida pelas tensões principais σ_1 e σ_3, que não ultrapassa a curva de resistência intrínseca, o material não romperá, enquanto se verificar a condição seguinte:

$$\frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_t - \sigma_c} \geq \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_t}{\sigma_t - \sigma_1 - \sigma_3} \tag{6.1}$$

em que:

σ_c – tensão de rotura à compressão do material (MPa);

σ_t – tensão de rotura à tracção do material (MPa);

$\sigma_1; \sigma_3$ – tensões principais (MPa).

No caso das tensões de tracção serem ambas de tracção, o critério de rotura a utilizar é o critério da tensão norma máxima, verificando a condição:

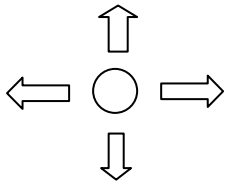
$$\sigma_1 \leq \sigma_t \tag{6.2}$$

Como o material não suporta tensões superiores a σ_t e ($\sigma_1 < \sigma_t$) e a expressão (6.1), só dá resultados aceitáveis se $\sigma_3 > 0$, a quantidade $\sigma_t - \sigma_1 - \sigma_3$ toma sempre valores positivos, portanto adoptamos a expressão equivalente:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_t} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \leq 1 \tag{6.3}$$

Esta é a expressão que traduz o critério de Mohr-Coulomb, para a previsão de rotura de materiais frágeis.

Como os materiais envolvidos (argamassa e material cerâmico), a resistência à compressão é muito superior à resistência à tracção, em geral com uma relação de 1/10 ou menos. Nesta perspectiva, pensando que a tracção do material é a causa principal de fissuração, o critério de rotura terá o seguinte aspecto:



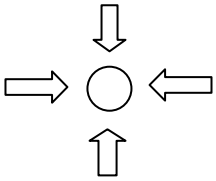
$$\frac{\sigma_{t-\max}}{\sigma_t} \leq 1 \tag{6.4}$$

em que:

σ_t – tensão de rotura à tracção do material (MPa);

$\sigma_{t-\max}$ – tensões de tracção máxima (MPa).

Um critério complementar, aplicado às paredes alvenarias, é o de compressão Máxima.



$$\frac{\sigma_{c-\max}}{\sigma_c} \leq 1 \tag{6.5}$$

em que:

σ_c – tensão de rotura à compressão do material (MPa);

$\sigma_{c-\max}$ – tensões de compressão máxima (MPa).

6.6.2. LIMITES DE ROTURA DE UMA PAREDE DE ALVENARIA

Uma parede de alvenaria suporta tensões até um dado limite sem que atinja o seu ponto de rotura, ou seja, até esse limite de tensão a parede permanece num domínio elástico-linear, sem fissurar.

No EC6: Part 1-1 [6] encontra-se definida a tensão limite de rotura de uma parede de alvenaria em cada um das direcções, ou seja, define um valor limite para a tensão de compressão, corte e flexão.

A tensão de compressão é dada pela seguinte expressão:

$$f_k = k * f_b^{0,7} * f_m^{0,3} \quad (6.6)$$

em que:

f_k – tensão de rotura à compressão do material (MPa);

k – constante função do tipo de unidade de alvenaria e argamassa;

f_b – tensão de compressão média normalizada das unidades de alvenaria (MPa);

f_m – tensão de compressão da argamassa (MPa).

No caso corrente de paredes de alvenaria com unidades de alvenaria cerâmica é corrente tomarem-se os seguintes valores:

- k=0,45;
- f_b=3 MPa;
- f_m=5 MPa.

Com base nestes valores obtém-se uma tensão limite de rotura à compressão para uma parede de alvenaria de 1,58 MPa.

Como foi referido anteriormente a tensão de tracção de uma parede de alvenaria é muito reduzida, o que significa que a parede praticamente não tem resistência à tracção. No entanto, é corrente admitir-se uma tensão à tracção residual na ordem de 1/10 da tensão de compressão, tomando um valor no caso em estudo de 0,158 MPa.

Para a determinação da tensão limite de corte o EC6: Part 1-1 [6] define a seguinte expressão:

$$f_{vk} = f_{vk0} * 0,4\ \sigma_d \quad (6.7)$$

em que:

f_{vk} – tensão de rotura ao corte do material (MPa);

f_{vk0} – tensão de corte inicial, função do tipo de unidade de alvenaria e argamassa (MPa);

σ_d – tensão de compressão de projecto do nível superior ao que se está a determinar a tensão de corte (MPa).

No caso corrente das paredes de alvenaria, os valores assumidos são os seguintes:

- f_{vk0}=0,20 MPa;
- σ_d é retirado do programa, sendo a tensão de compressão na direcção vertical na zona de ligação da parede de alvenaria com a estrutura na ordem dos 0,20 MPa.

Desta forma obtém-se uma tensão limite ao corte da parede de alvenaria na ordem dos 0,28 MPa.

Com estes valores, e de uma forma separada é possível concluir se a parede quando sujeita apenas a um diferencial de temperatura se mantém em regime elástico-linear, ou seja, se não fissura, e qual a sua contribuição para a rotura global da parede.

6.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.7.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS

Nos trabalhos realizados, a análise foi efectuada num estado tridimensional de tensões, uma vez que se tratou de uma análise a três dimensões. Na fig. 6.6. apresenta-se as componentes da tensão num elemento unitário.

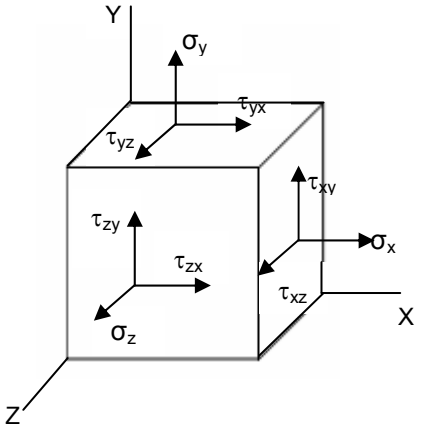


Fig.6.6 – Componentes da tensão (estado tridimensional)

As tensões obtidas com maior relevo são na direcção vertical e horizontal, ou seja, na direcção perpendicular ao plano (direcção ZZ) as tensões são praticamente nulas, salvo nas zonas dos pilares e vigas que apresentam tensões mais elevadas. Esta situação resulta de na direcção dos ZZ os deslocamentos na parede não estarem impedidos, resultando tensões praticamente nulas, ao contrário do que acontece com a estrutura, que se encontra impedida de se deslocar nessa direcção.

É importante salientar que as tensões principais máximas são praticamente nulas quando não existem tensões de tracção na parede de alvenaria, uma vez que essas tensões são muito influenciadas pelas tensões de tracção. As tensões principais mínimas tomam valores muito semelhantes aos das tensões segundo YY, uma vez que esta é a que apresenta um maior contributo para as tensões principais.

As tensões em XX eYY são muito semelhantes, tendo valores da mesma ordem de grandeza, pelo que na análise se optou por analisar apenas uma destas tensões, no caso as tensões segundo YY.

No Quadro 6.5 apresentam-se os resultados das tensões em YY na face exterior e interior da parede de alvenaria e os deslocamentos máximos obtidos na simulação numérica efectuada para as várias situações descritas no Quadro 6.4. Nos Anexos 1, 2 e 3 apresentam-se os resultados gráficos das tensões, dos deslocamentos e da distribuição de temperaturas em cada uma das soluções estudadas.

Quadro 6.5 – Síntese de resultados

Situação de parede	Simulação	Tensão na face interior (MPa)	Tensão na face exterior (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
Parede simples	SA1	-0,29	-0,14	0,08
	SA2	-0,29	-0,14	0,07
	SA3	-0,29	-0,14	0,08
	SA4	-0,27	-0,16	0,08
	SA5	-0,34	-0,50	0,13
	SA6	-0,26	-0,15	0,09
	SA7	-0,36	-0,48	0,13
	SA8	-0,08	0,09	0,06
	SA9	-0,07	0,09	0,06
Parede simples com isolamento pelo exterior	SB1	-0,29	-0,29	0,04
	SB2	-0,23	-0,23	0,05
	SB3	-0,29	-0,29	0,05
	SB4	-0,29	-0,29	0,05
	SB5	-0,33	-0,33	0,05
	SB6	-0,29	-0,29	0,07
	SB7	-0,33	-0,33	0,05
	SB8	-0,08	-0,08	0,02
	SB9	-0,02	-0,02	0,03
Parede dupla	SC1	-0,31	-0,12	0,06
	SC2	-0,27	-0,14	0,07
	SC3	-0,31	-0,12	0,06
	SC4	-0,31	-0,12	0,06
	SC5	-0,31	-0,50	-0,12
	SC6	Não se conseguiu obter resultados		
	SC7	Não se conseguiu obter resultados		
	SC8	-0,10	0,09	0,06
	SC9	-0,07	0,07	0,06

6.7.2. COMENTÁRIOS AOS RESULTADOS

Pela análise dos resultados obtidos é possível efectuar uma comparação entre as três soluções de parede de uma forma simplificada.

Desta forma, constata-se que a parede simples está sujeita a um gradiente de temperatura mais elevado do que a parede que apresenta isolamento térmico pelo exterior, esta situação ocorre devido ao pano da parede se encontrar do lado quente, ou seja, pelo interior do isolamento. Esta situação leva a que a parede simples apresente uma variação de tensões em toda a sua espessura, ao contrário da parede que simula o sistema ETICS, que apresenta tensões constantes em toda a sua espessura.

Assim, verifica-se que as paredes com isolamento pelo exterior apresentam um menor potencial para fissurar, uma vez que as tensões não se aproximam tanto das tensões de tracção, principal causa da fissuração nas alvenarias.

No caso da parede dupla, é possível constatar que cada pano de parede se encontra sujeito a uma variação de temperatura reduzida, o que significa que as tensões em cada pano são praticamente constantes, estando o pano interior sujeito a uma tensão de compressão superior à do pano exterior. Desta forma, o pano exterior apresenta uma maior possibilidade de ocorrência de fissuração, uma vez que as tensões se encontram mais próximas das tensões de tracção.

Das três situações a parede simples com isolamento pelo exterior é aquela que apresenta tensões constantes em toda a sua espessura, pelo que em princípio será aquela que terá uma menor probabilidade de ocorrência de patologias, dado se encontrar bastante mais protegida do que as restantes hipóteses em análise.

Como já foi referido anteriormente, quando se adopta uma ligação entre materiais (estrutura e parede de alvenaria) que permite o deslizamento, o programa gera alguns problemas, principalmente na solução de parede dupla, situação mais complexa. Assim, face ao tempo disponível para a realização do trabalho este aspecto não foi muito aprofundado, considerando-se pertinente uma abordagem futura com um maior grau de profundidade.

Por este motivo, em duas das simulações efectuadas para a solução de parede dupla (SC6 e SC7) não se conseguiram obter resultados, quando se admite uma ligação que permite o deslizamento, conforme se constata no Quadro 6.5.

Outro aspecto a salientar é que nas simulações em que se admite todas as variáveis iguais com excepção do tipo de ligação entre materiais, os resultados obtidos são praticamente iguais, ou seja, da mesma ordem de grandeza. Como já foi referido, este aspecto não foi muito estudado, pelo que a interpretação dos resultados carece de alguma precaução.

7

CONCLUSÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi dedicado ao tema geral da influência das variações de temperatura no desempenho mecânico das paredes de alvenaria, tendo como principal motivação o facto de surgirem, de modo cada vez mais frequente, anomalias graves neste tipo de paredes, sem se saber concretamente qual a contribuição dessas variações de temperatura para o estado global de tensão da construção.

É importante salientar que o trabalho realizado consistiu numa integração da análise térmica com os problemas mecânicos, até aqui estudados quase sempre de forma separada. No entanto, constatou-se que este é um problema complexo, representando este trabalho apenas o início de um estudo que deverá ser bastante aprofundado para se ter uma maior confiança nos resultados obtidos.

Para a clara percepção do problema, desenvolveram-se os principais aspectos relevantes:

- exigências aplicáveis às unidades de alvenaria e de betão;
- condicionalismos exigenciais da envolvente dos edifícios;
- métodos de determinação das características térmicas dos materiais e produtos para alvenaria;
- exigências aplicáveis aos revestimentos de paredes de alvenaria;
- caracterização das principais causas de fissuração das paredes de alvenaria.

A análise mais aprofundada incidiu no desenvolvimento de um modelo, por recurso ao método dos elementos finitos, para simular o comportamento térmico das paredes em regime permanente, que permite identificar a sua influência no comportamento mecânico das paredes de alvenaria.

As principais dificuldades no trabalho prenderam-se, sobretudo com os seguintes aspectos:

- dificuldade na simulação numérica, decorrente do problema complexo que envolvia todo o trabalho, ou seja, tratar simultaneamente a térmica e a mecânica;
- dificuldade em definir o tipo de ligação existente entre os materiais, ou seja, entre a parede de alvenaria e a estrutura;
- discretização fina dos elementos para alvenaria adoptada no modelo de simulação numérica, requer um tempo de cálculo considerável.

Pensa-se que este trabalho possa contribuir para uma visão integrada de alguns dos aspectos essenciais relacionados com as anomalias das paredes de alvenaria, isto é, que os resultados possam de alguma forma mostrar o quanto as variações de temperatura contribuem para a fissuração das paredes de alvenaria.

É importante salientar que estes resultados surgiram de um primeiro estudo, em que foram surgindo várias dificuldades ao longo do seu desenvolvimento, pelo que será necessário ter algum precaução na sua interpretação.

7.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

7.2.1. PAREDE SIMPLES

Este tipo de parede quando sujeita a uma temperatura interior de 25 ºC e exterior de 5 ºC encontra-se totalmente à compressão, pelo facto de ter havido um aumento do estado de tensão com o acréscimo da temperatura média da parede em 15 ºC.

Pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb explicado no Capítulo 6, é possível analisar neste caso qual a influência da variação de temperatura no desempenho global da estrutura. Desta forma, as tensões de compressão máximas numa parede simples, para as temperaturas ambiente definidas acima, são na ordem dos 0,29 MPa. Para uma parede de alvenaria corrente, como foi referido anteriormente, o valor limite que uma parede suporta sem entrar em rotura por compressão é de 1,58 MPa. Comparando os dois valores é possível constatar que uma parede simples contribui em cerca de 18% para a rotura global por compressão.

Numa situação típica de Verão, com uma temperatura exterior de 40 ºC e interior de 20 ºC, as tensões de compressão são máximas na face exterior com um valor na ordem dos 0,50 MPa. Tal aspecto deve-se ao aumento da temperatura média da construção em cerca de 30 ºC, o que provoca um maior estado de tensão, mantendo-se a parede toda à compressão.

Nesta situação, pode-se concluir que a existência de um diferencial de temperatura deste tipo contribui em cerca de 32% para a rotura global por compressão de uma parede de alvenaria. Esta contribuição é muito mais elevada do que no caso anterior, pelo facto de se aumentar o próprio estado de tensão a que a alvenaria passa a estar sujeita.

Na outra hipótese, em que a temperatura exterior é de -10 ºC e a interior de 10 ºC verifica-se que existem tracções na face exterior e compressões na face interior. Esta situação reflecte o facto de não se ter introduzido nenhum estado de tensão, uma vez que a temperatura média a que a parede está sujeita é de 0 ºC.

Como já foi referido no Capítulo 6 uma parede de alvenaria tem uma resistência à tracção muito reduzida, no caso concreto na ordem dos 0,158 MPa. Com base neste valor, pode-se concluir que numa parede que apresente tracções e compressões em pontos totalmente distintos, contribui tanto para uma possível rotura por tracção como por compressão. Assim, a existência de um diferencial de temperatura com as características definidas contribui em cerca de 51% para a rotura global à tracção de uma parede de alvenaria e em cerca de 5% para a rotura por compressão.

Esta análise mostra que o facto de não se induzir um aumento do estado de tensão (temperatura média da parede mantém-se constante) torna a parede muito mais susceptível de fissurar, uma vez que apresenta tensões de tracção que são muito prejudiciais para as paredes de alvenaria e que um simples diferencial de temperatura contribui em cerca de metade do valor limite que a parede suporta.

7.2.2. PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

Numa parede simples com isolamento pelo exterior, pelos resultados apresentados no Quadro 6.5, facilmente se constata que a parede, independentemente da situação simulada, apresenta compressões em toda a sua espessura.

Desta forma, um diferencial de temperatura corrente em Portugal (temperatura interior de 25 ºC e exterior de 5 ºC) provoca em média um acréscimo de temperatura de 15 ºC, o que contribui em cerca de 18% para a rotura global por compressão da parede de alvenaria, uma vez que a parede apresenta uma tensão de compressão de 0,29 MPa constante em toda a sua espessura.

No outro caso simulado, em que a temperatura exterior é de -10 ºC e a interior de 10 ºC, apesar da parede se encontrar totalmente à compressão, estes valores são muito inferiores, resultado de não se submeter a parede a uma dado estado de tensão, uma vez que a temperatura média a que se encontra nestas condições é de 0 ºC. Assim, a contribuição desta análise térmica para a rotura global da parede de alvenaria por compressão é de cerca de 5%.

Esta situação é mais gravosa quando se admite a situação hipotética da camada de isolamento térmico apresentar uma espessura de 1 cm, com um coeficiente de transmissão térmica de 1,0 W/(m^2.ºC), uma vez que a tensão obtida na parede é praticamente nula. Apesar de a parede apresentar uma contribuição mínima para a rotura por compressão, como o valor da tensão é muito reduzido, esta solução pode contribuir facilmente para a ocorrência de fissuração, uma vez que tem valores muito próximos dos de tracção.

Com estes valores é possível concluir que a existência da camada de isolamento térmico pelo exterior do pano de alvenaria, é em todo benéfico para o melhor comportamento da parede, uma vez que o diferencial de temperatura não contribui para a rotura por tracção, que é a principal causa de fissuração da parede de alvenaria.

7.2.3. PAREDE DUPLA

Na situação de parede dupla, cada pano está sujeito a tensões de compressão praticamente constantes, ou seja, o pano interior como se encontra do lado quente do isolamento térmico apresenta tensões mais elevadas. Assim, a existência de um diferencial de temperatura numa parede dupla (temperatura interior 25 ºC e temperatura exterior 5 ºC) contribui na ordem dos 20% para a rotura global por compressão de uma parede de alvenaria.

Este valor passa para cerca de 32% quando se simula a parede numa situação típica de Verão, ou seja, com uma temperatura exterior de 40 ºC e interior de 20 ºC. Este aspecto deve-se à temperatura a que se encontra a parede ter aumentado em média 30 ºC, o que levou a uma alteração do estado de tensão em que se encontrava inicialmente.

Quando a parede se encontra sujeita a uma temperatura exterior de -10 ºC e interior de 10 ºC constata-se que o pano interior apresenta tensões de compressão e o pano exterior tensões de tracção, devido à parede não se encontrar em expansão, isto é, não se provocou um aumento da temperatura inicial da parede (temperatura média 0 ºC). Este aspecto leva a que a existência de um diferencial de temperatura que não provoque o aumento da temperatura média da parede dupla, contribua em cerca de 51% para a rotura por tracção e em 6% para a rotura por compressão da parede de alvenaria.

7.2.4. COMPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Com base nas conclusões referidas acima é agora possível efectuar uma comparação entre as três soluções.

Uma parede de alvenaria praticamente não apresenta resistência à tracção, pelo que será de evitar que as paredes estejam sujeitas a condições que induzam este estado crítico. Assim, pela análise efectuada é possível constatar que a melhor solução será aquela que tem o isolamento térmico pelo exterior (sistema ETICS), uma vez que em qualquer das simulações realizadas a parede apresenta sempre tensões de compressão, não correndo o risco de fissurar, admitindo-se que a tracção é a principal causa de fissuração neste tipo de paredes.

As outras duas soluções estudadas, como não se encontram do lado quente do isolamento térmico, dado a parede simples não possuir isolamento e na parede dupla apenas o pano interior se encontrar nestas condições, apresentam tensões de compressão muito baixas na face exterior, e em determinadas condições contribuem em cerca de metade para a rotura por tracção da parede. Isto significa que a tensão de tracção instalada corresponde a metade do valor limite suportado sem entrar em rotura.

Desta forma, numa primeira análise a parede com isolamento pelo exterior será aquela que se comportará melhor perante um diferencial de temperatura de 20 ºC, em diferentes situações de temperaturas ambiente. Esta afirmação só será verdade se todas as exigências de execução forem convenientemente realizadas para que não ocorram outro tipo de anomalias.

7.3. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

Os resultados obtidos deste estudo resultam de uma primeira análise nesta abordagem conjunta da análise térmica com os problemas mecânicos de uma parede de alvenaria. Apesar de com base neste trabalho ser possível retirar algumas conclusões acerca da contribuição da influência das variações de temperatura para o comportamento global da parede de alvenaria, é necessário ter alguma precaução na interpretação dos resultados. Por isso, pensa-se que haverá ainda muito a fazer neste domínio, uma vez que este trabalho representa o início de um longo curso sobre estes assuntos.

Assim, o trabalho motiva diversas perspectivas de desenvolvimento, podendo ser prosseguidas várias perspectivas:

- simular com maior grau de profundidade os aspectos abordados ao longo deste trabalho, como a hipótese da influência da distância entre pilares;
- simular o comportamento térmico da parede em regime não estacionário e a sua repercussão nos aspectos analisados neste trabalho;
- analisar o efeito da existência de aberturas nos vãos e do reboco exterior e interior;
- desenvolvimento de modelos mais adequados para este estudo, que permitam simular a real ligação entre a parede de alvenaria e a estrutura de betão;
- simular conjuntamente as acções a que a parede está sujeita e a variação de temperatura, por forma a analisar o comportamento global da parede de alvenaria;
- simular a parede de alvenaria de uma forma não homogénea, ou seja, considerando elementos de junta e a geometria da unidade que constitui a parede.

BIBLIOGRAFIA

[1] IPQ – NP EN 771-1. *Especificações para Unidades de Alvenaria. Parte 1: Tijolos Cerâmicos para Alvenaria.* IPQ, Lisboa, 2005.

[2] IPQ – NP EN 772-16. *Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria. Parte 16: Determinação das Dimensões*. IPQ, Lisboa, 2002.

[3] CEN – EN 771-3. *Specifications for Masonary Units. Part 3: Aggregate Concrete Masonary Units (Dense and Light-weight Aggregates). CEN*, 2003.

[4] IPQ – NP EN 772-3. *Métodos de Ensaio para Elementos de Alvenaria. Parte 3: Determinação do Volume Líquido e da Percentagem de Furação em Elementos Cerâmicos para Alvenarias por Pesagem Hidrostática*. IPQ, Lisboa, 2000.

[5] IPQ – NP EN 772-2. *Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria. Parte 2: Determinação da Percentagem de Furação em Blocos de Betão para Alvenaria (por Imersão em Papel).* IPQ, Lisboa, 2001.

[6] CEN – EN 1996-1-1. *Eurocode 6 – Design of Masonary Structures. Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreiforced Masonary.* CEN, 2005.

[7] IPQ – NP EN 772-13. *Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria. Parte 13: Determinação da Massa Volúmica Real Seca e da Massa Volúmica Aparente Seca de Blocos para Alvenaria (excepto blocos de pedra natural)*. IPQ, Lisboa, 2002.

[8] IPQ – NP EN 772-11. *Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria. Parte 11: Determinação da Absorção de Água – por Capilaridade de Blocos para Alvenaria de Betão de Agregados, de Betão "Face à Vista" e de Pedra Natural, e da Taxa de Absorção Inicial de Água de Blocos Cerâmicos*. IPQ, Lisboa, 2002.

[9] IPQ – NP EN 1745. *Alvenarias e Elementos de Alvenaria – Métodos para Determinação de Valores Térmicos de Cálculo*. IPQ, Lisboa, 2005.

[10] ISO – EN ISO 12572. *Hygrothermal Performance of Building Materials and Products. Determination of Water Vapour Transmission Properties.* ISO, Genéve, 2001.

[11] CEN – EN 772-19. *Methods of Test for Masonary Units. Part 19: Determination of Moisture Expansion of Large Horizontally Perforated Clay Masonary Units.* CEN, 2000.

[12] IPQ – NP EN 772-1. *Métodos de Ensaio de Blocos para Alvenaria. Parte 1: Determinação da Resistência à Compressão.* IPQ, Lisboa, 2002.

[13] IPQ – NP EN 772-5. *Métodos de Ensaio para Elementos de Alvenaria. Parte 5: Determinação do Teor de Sais Solúveis Activos de Tijolos Cerâmicos para Alvenaria.* IPQ, Lisboa, 2007.

[14] CEN – EN 13501-1. *Fire Classification of Construction Products and Building Elements. Part 1: Classification Using Test Data from Reaction to Fire Tests.* CEN, 2007.

[15] IPQ – NP EN 1052-3. *Métodos de Ensaio para Alvenaria. Parte 3: Determinação da Resistência Inicial ao Corte*. IPQ, Lisboa, 2005.

[16] PORTUGAL – Leis, Decretos, etc. – *Regulamento de Segurança contra Incêndio* (Decreto-Lei nº 64/1990, de 21 de Fevereiro). Lisboa: Imprensa Nacional, 1990.

[17] PORTUGAL – Leis, Decretos, etc. – *Regulamento Geral de Segurança contra Incêndio em Edifícios* (Decreto-Lei nº 83/2007, aprovado em Conselho de Ministros de 2007-01-25).

[18] CEN – EN 13823. *Reaction to Fire Tests for Building Products. Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item. CEN*, 2002.

[19] ISO – EN ISO 11925-2. *Reaction to Fire Tests. Ignitability of Building Products Subjected to direct Impingement of Flame.Part 2: Single-flame Source Test.* ISO, Genéve, 2002.

[20] PORTUGAL – Leis, Decretos, etc. *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios* (Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de Maio). Lisboa: Imprensa Nacional, 2002.

[21] PORTUGAL – Leis, Decretos, etc. *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril). Lisboa: Imprensa Nacional, 2006.

[22] BSI – BS 5628: Part 3. *British Standards Code of Practice for Use of Masonary. Part 3: Materials and Components, Design and Workmanship*. BSI, London, 2005.

[23] CSTB – DTU 20.1. *Ouvrage en Maçonnerie de Petits Éléments – Parois et Murs*. CSTB, Paris, 1994.

[24] CEN – EN 1996-2. *Eurocode 6 – Design of Masonary Structures. Part 2: Design Considerations, Selections of Materials and Execution of Masonary.* CEN, 2005.

[25] LNEC. *Relatório 57/99 – NCCt – Determinação Experimental do Coeficiente de Transmissão Térmica de Alvenarias em Câmara Climática*. LNEC, Lisboa, 1999.

[26] SOUSA, Hipólito. *Melhoria so Comportamento Térmico e Mecânico das Alvenarias por Actuação na Geometria dos Elementos. Aplicação a Blocos de Betão de Argila Expandida*. FEUP, Porto, 1996.

[27] ISO – TECHNICAL REPORT 9165. *Practical Thermal Properties of Building Materials and Products.* ISO, Genéve, Dec. 1988.

[28] PINA DOS SANTOS, C. A.; PAIVA, J. V. – ITE 50. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, Lisboa, 2007.

[29] ISO – EN ISO 6946. *Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method.* ISO, Genéve, 1996.

[30] MIMOSO, J. M. – ITE 14. *Transmissão de Calor. Bases Teóricas para Aplicação à Térmica de Edifícios.* LNEC, Lisboa, 1987.

[31] KREITH, F.; BOHN M. S.. *Principles of Heat Transfer*. Thomson, USA, 2001.

[32] ASHRAE. *2005 ASHRAE Handbook. Fundamentals. S.I. Edition*. ASHRAE, Atlanta, 2005.

[33] SIEGEL, R.; HOWELL, J.. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor & Francis. USA, 1992.

[34] LNEC. *Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes.* LNEC, Lisboa, 1996.

[35] CEN – EN 998-1. *Specification for Mortar for Masonary. Part 1: Rendering and Plastering Mortar.* CEN, 2003.

[36] CEN – EN 998-2. *Specification for Mortar for Masonary. Part 2: Masonary Mortar.* CEN, 2003.

[37] CEN – EN 1015-2. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 2: Bulk Sampling of Mortars and Preparation of Test Mortars.* CEN, 1998.

[38] CEN – EN 1015-9. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 9: Determination of Workable Life and Correction Time of Fresh Mortar.* CEN, 1999.

[98] CEN – EN 1015-17. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 17: Determination of Water Soluble Chloride Content of Fresh Mortar*. CEN, 2000.

[40] CEN – EN 1015-7. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 7: Determination of Air Content of Fresh Mortar.* CEN, 1998.

[41] CEN – EN 1015-6. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar.* CEN, 1998.

[42] CEN – EN 1015-11. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar.* CEN, 1999.

[43] CEN – EN 1015-18. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 18: Determination of Water Absorption Coefficient due to Capillary Action of Hardened Mortar.* CEN, 2002.

[44] IPQ – NP EN 1015-19. *Métodos de Ensaio de Argamassas para Alvenaria. Parte 19: Determinação da Permeabilidade ao Vapor de Água de Argamassas de Reboco Endurecidas.* IPQ, Lisboa, 2000.

[45] CEN – EN 1015-21. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 21: Determination of the Compatibility of One-Coat Rendering Mortars with Substrates.* CEN, 2002.

[46] CEN – EN 1015-10. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar.* CEN, 1999.

[47] CEN – EN 1015-12. *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 12: Determination of Adhesive Strength of Hardened Rendering and Plastering Mortars on Substrates.* CEN, 2000.

[48] CEN – EN 1015-1 *Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 1: Determination of Particle Size Distribution (by Sieve Analysis).* CEN, 1998.

[49] ALVES, Sérgio. *Paredes Exteriores de Edifícios em Pano Simples. Fundamentos, Desempenho e Metodologia de Análise.* Tese de Mestrado. FEUP, Porto, 2001.

[50] PEIXOTO DE FREITAS, Vasco. *Relatório – HT 191A/02 – Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior. Reboco Delgado Armado sobre Poliestireno Expandido – ETICS*. MAXIT, Porto, 2002.

[51] VICENTE, Romeu. *Patologia das Paredes de Fachada. Estudo do Comportamento Mecânico das Paredes de Fachada com Correcção Exterior das Pontes Térmicas.* Tese de Mestrado. FCTUC, Coimbra, 2002.

[52] HERZOG, Thomas; KRIPPNER, Roland; LANG, Werner. *Construire des Façades.* Detail, Munich, 2007.

[53] CSTB – Cahier 2840. *Les Joints et Leur Géométrie*. CSTB, Paris, 1995.

[54] ADELL ARGILÉS, Josep Mª. *Arquitectura sin Fisuras.* Munilla-Lería, Madrid, 2000.

[55] MENDES DA SILVA, José. Capítulo 2 – Fissuração das Paredes de Alvenaria de Tijolo. *Fissuração das Alvenarias. Estudo do Comportamento das Alvenarias sob Acções Térmicas.* Tese de Douturamento. FCTUC, Coimbra, 1998.

A1

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE SIMPLES

A1.1. GENERALIDADES

Com o objectivo de ilustrar os resultados relativos à simulação numérica do comportamento da parede da envolvente do tipo parede simples, quando sujeita a um gradiente de temperatura, apresentam-se neste Anexo 1, alguns exemplos de saídas gráficas fornecidas pelo programa *ABAQUS*.

A1.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A1.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA1

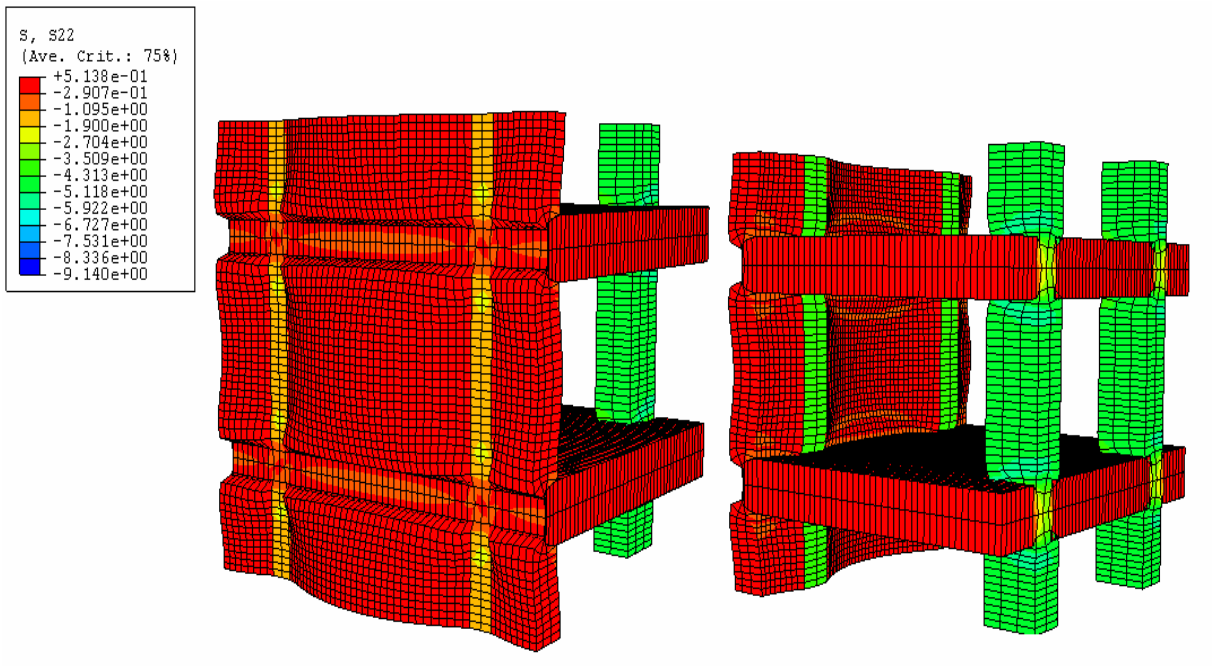


Fig. A1.1 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

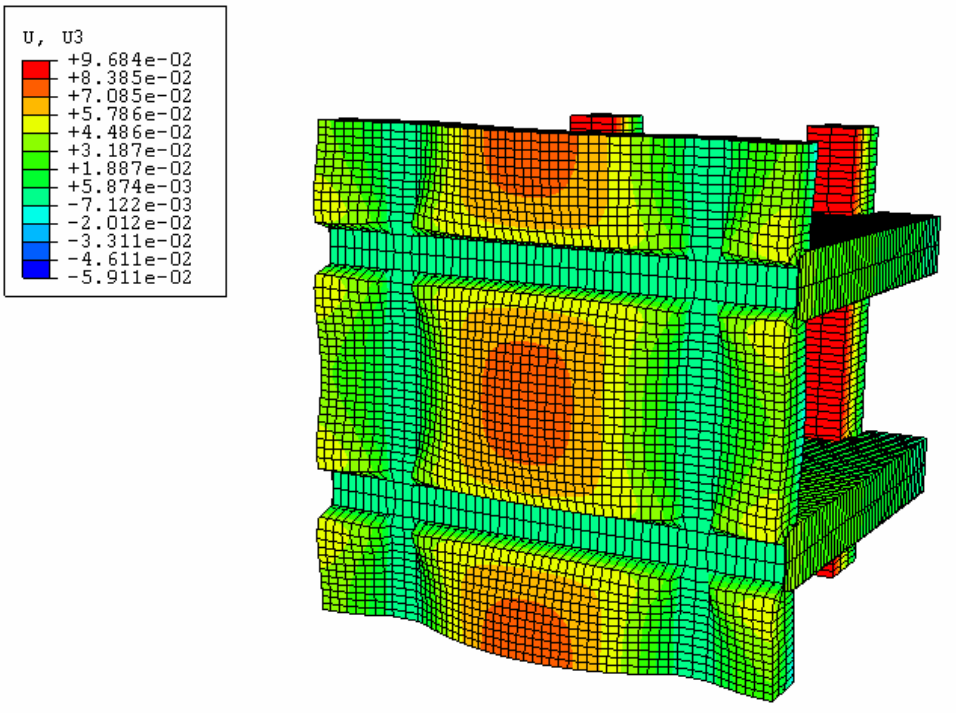


Fig. A1.2 – Deslocamentos máximos

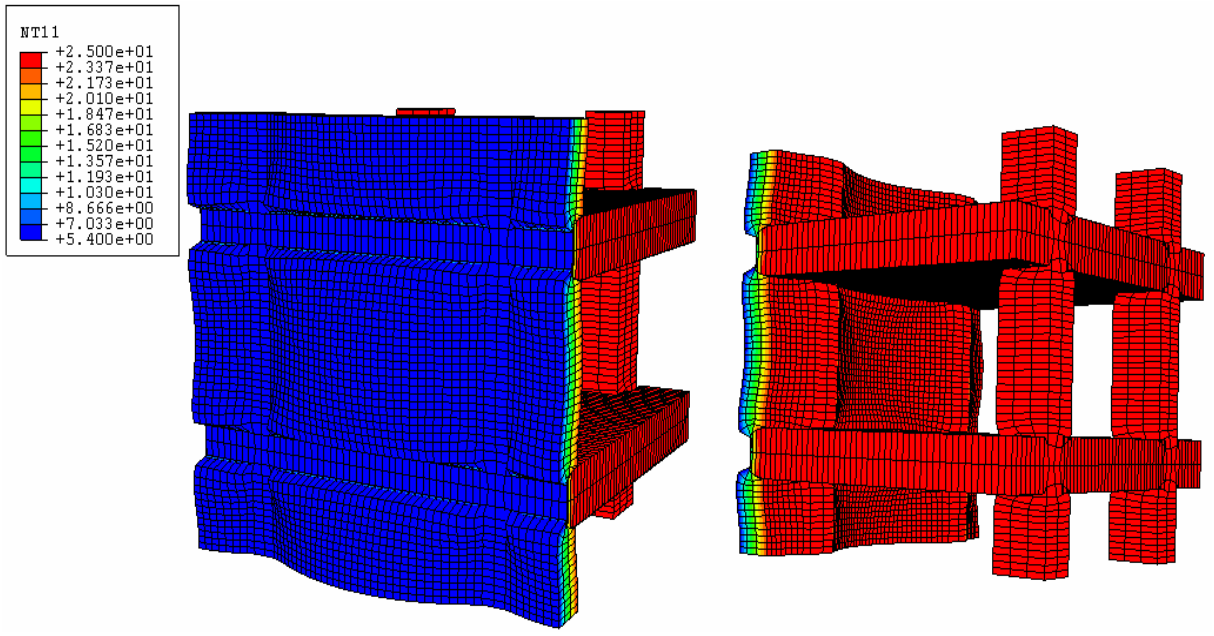


Fig. A1.3 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA2

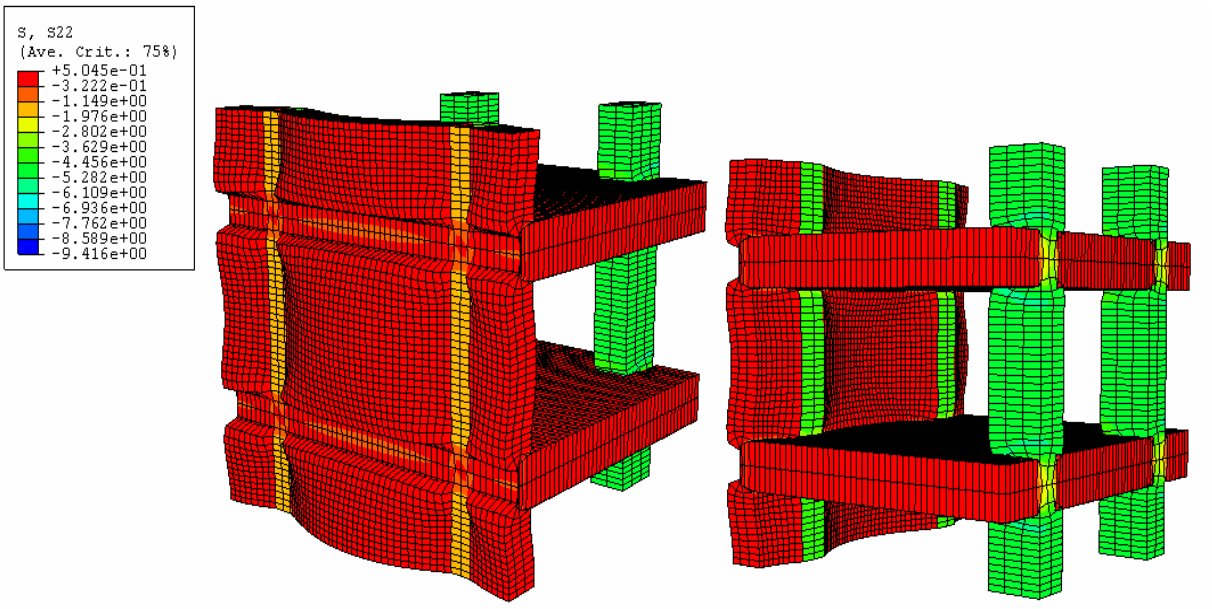


Fig. A1.4 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

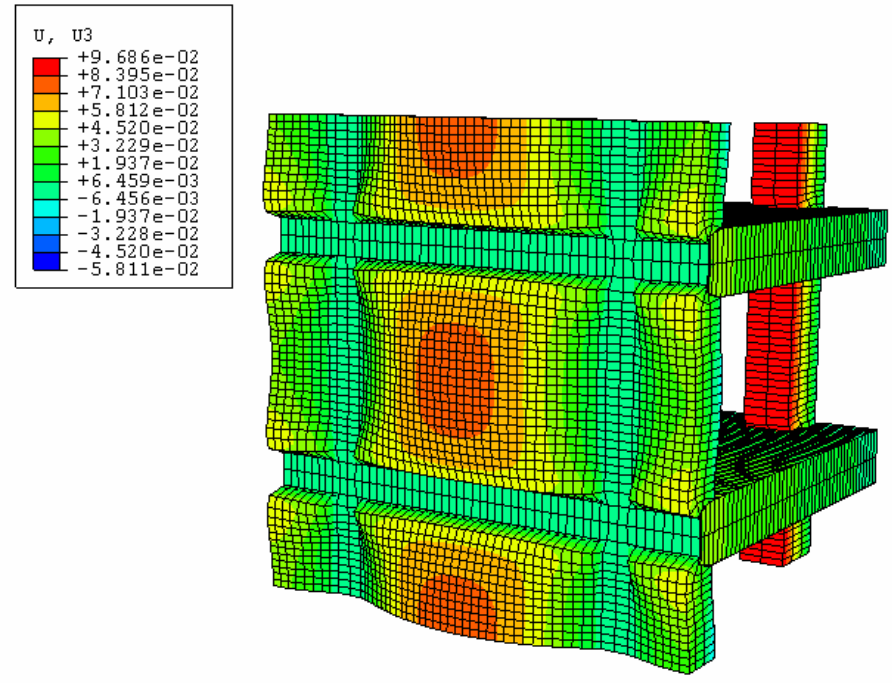


Fig. A1.5 – Deslocamentos máximos

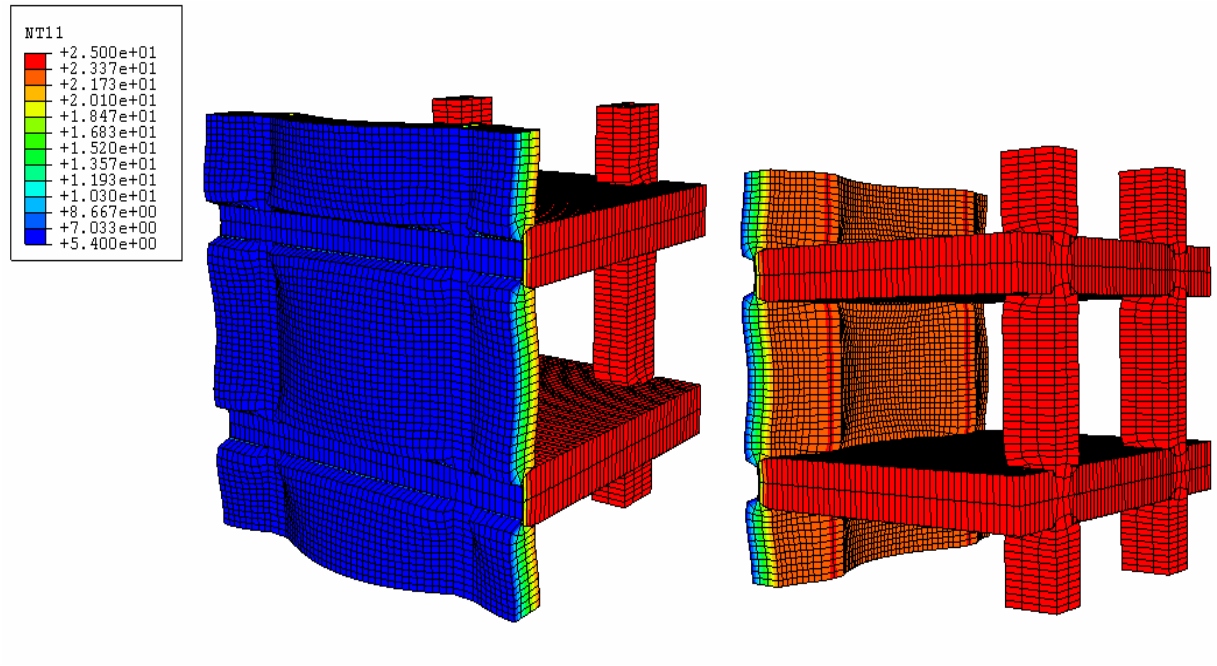


Fig. A1.6 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA3

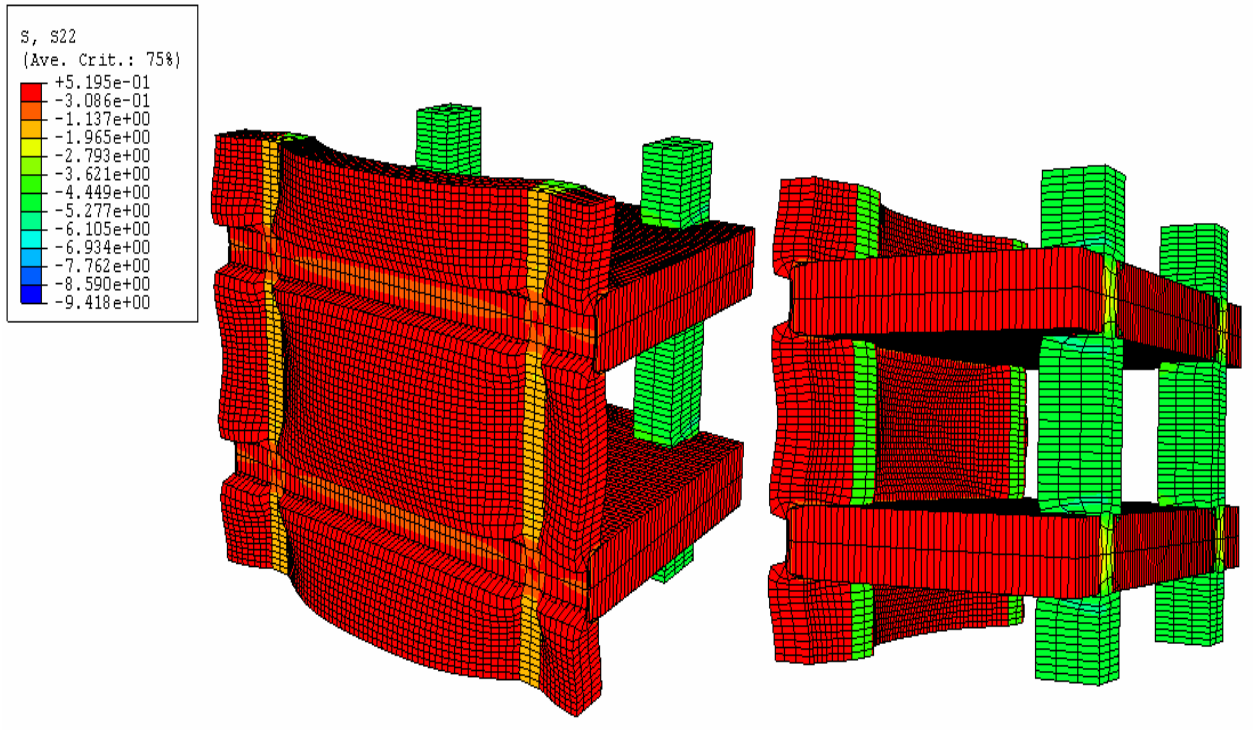


Fig. A1.7 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

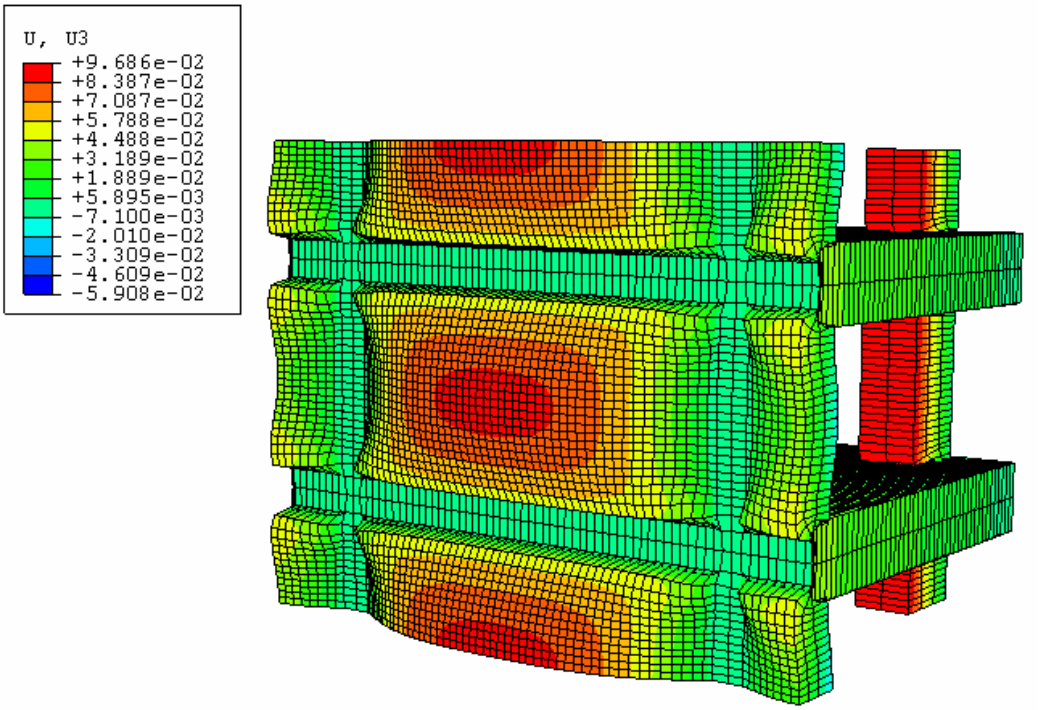


Fig. A1.8 – Deslocamentos máximos

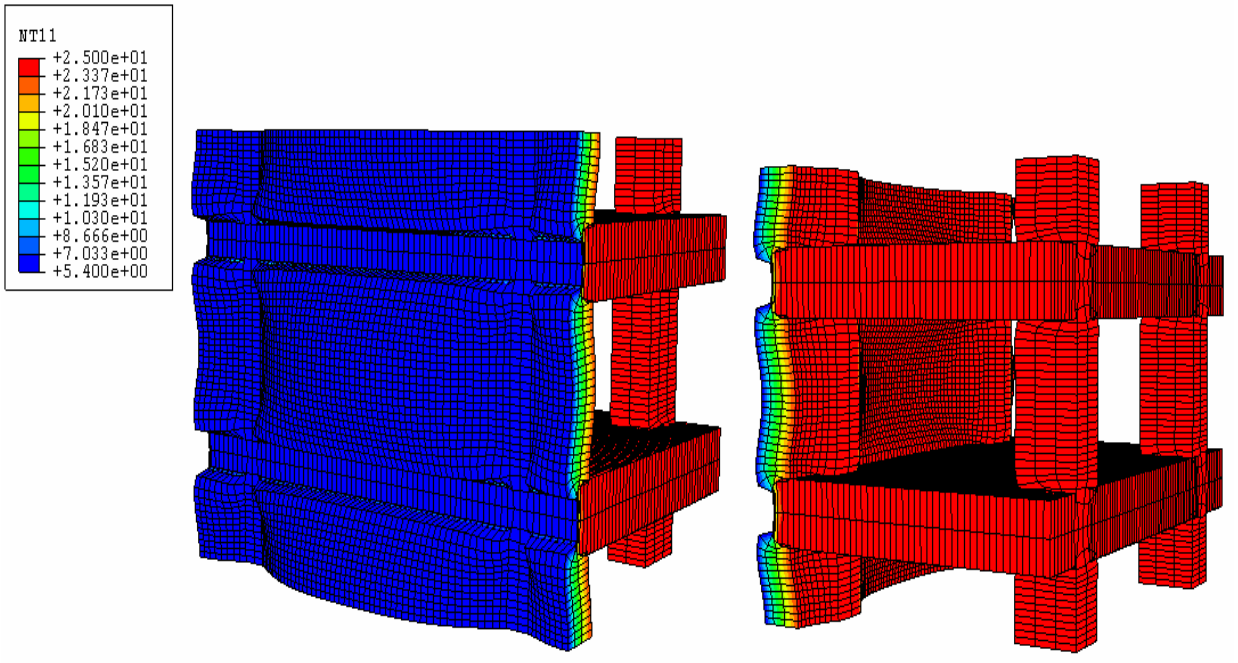


Fig. A1.9 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA4

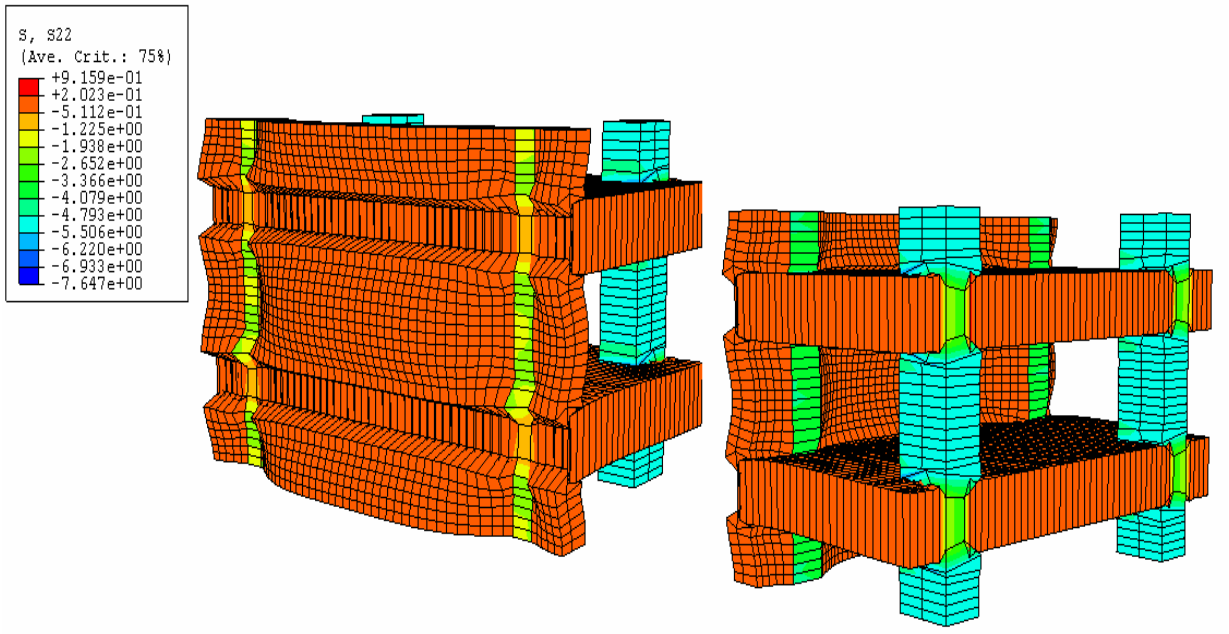


Fig. A1.10 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

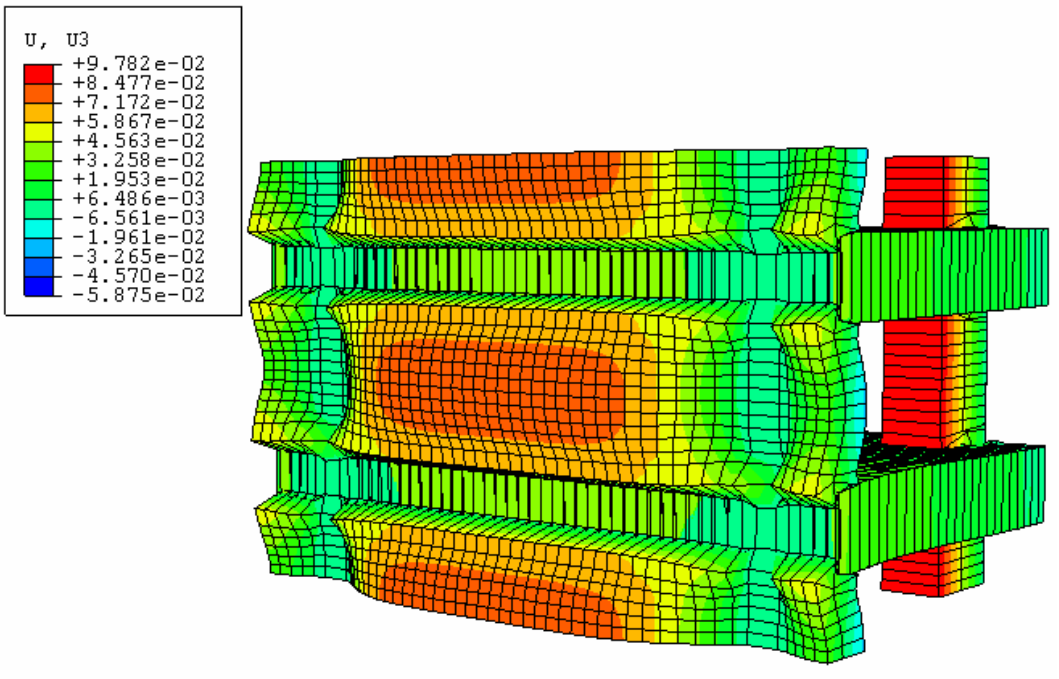


Fig. A1.11 – Deslocamentos máximos

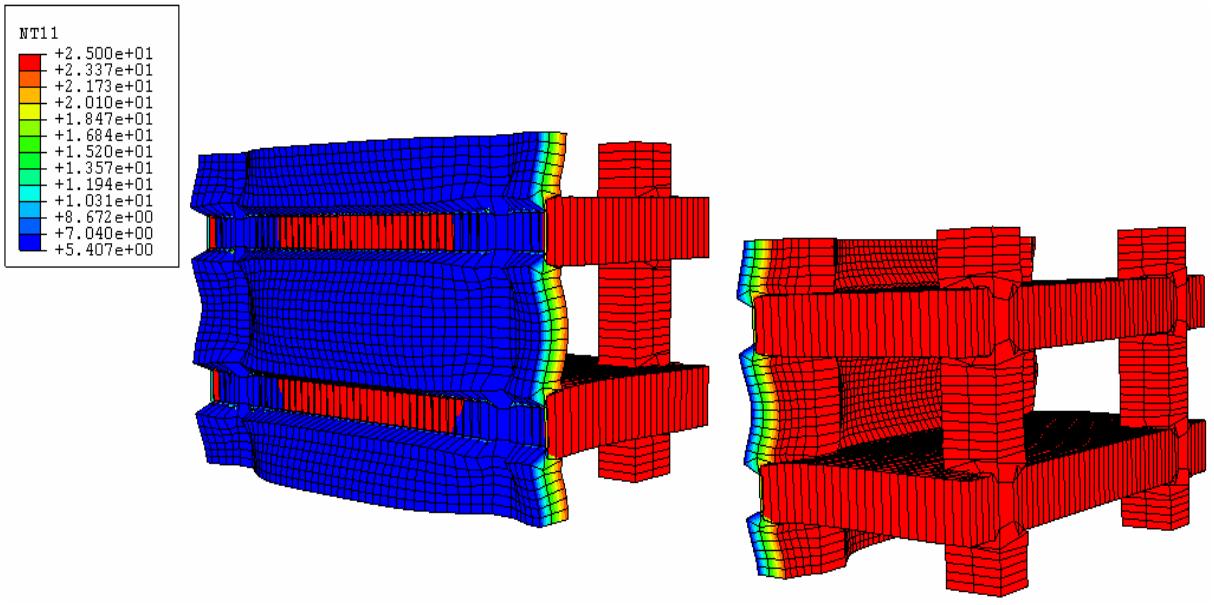


Fig. A1.12 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA5

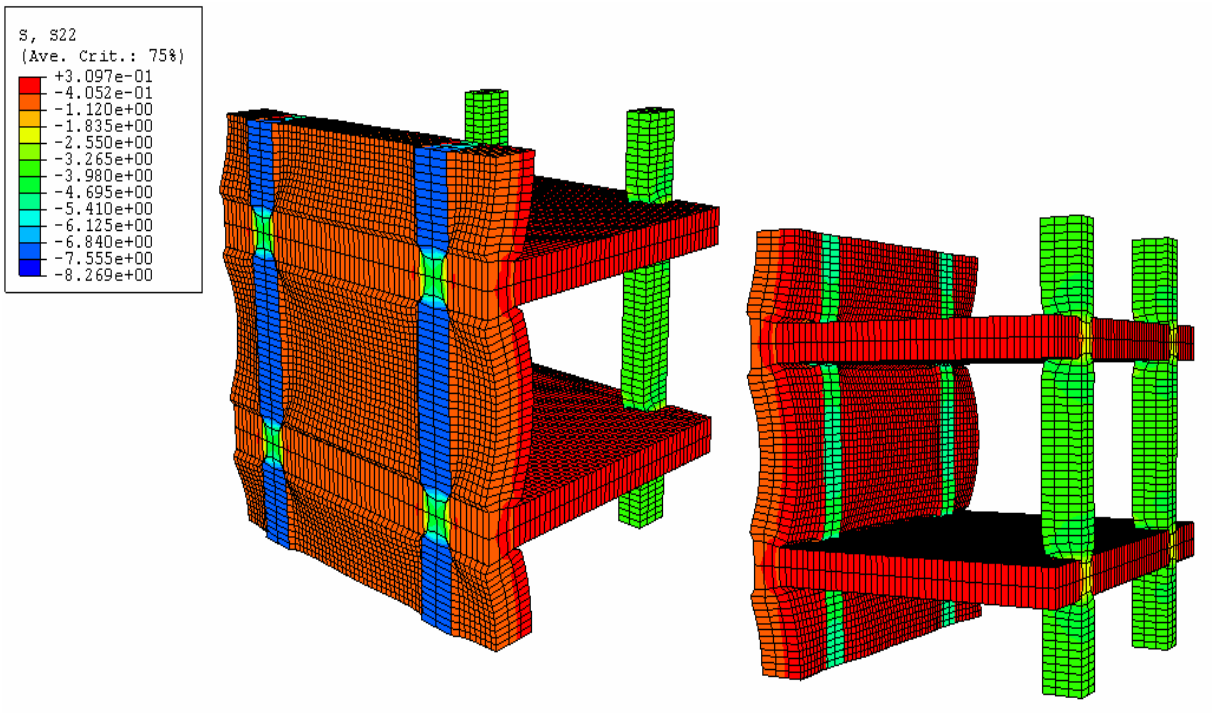


Fig. A1.13 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

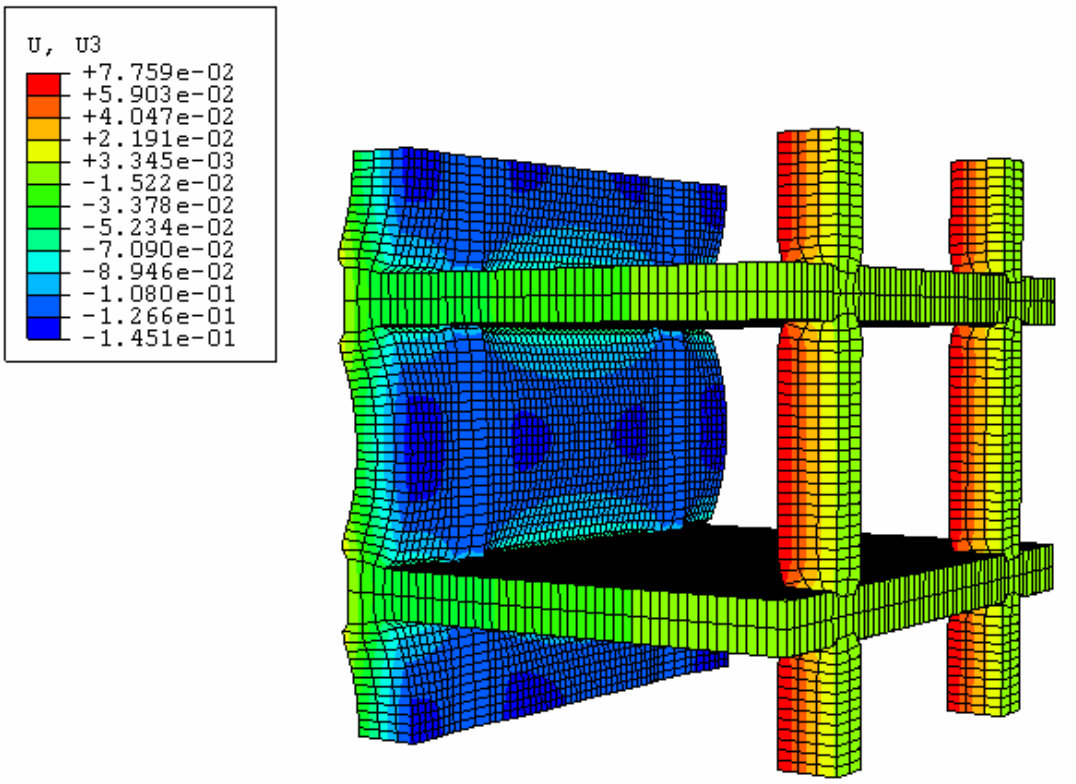


Fig. A1.14 – Deslocamentos máximos

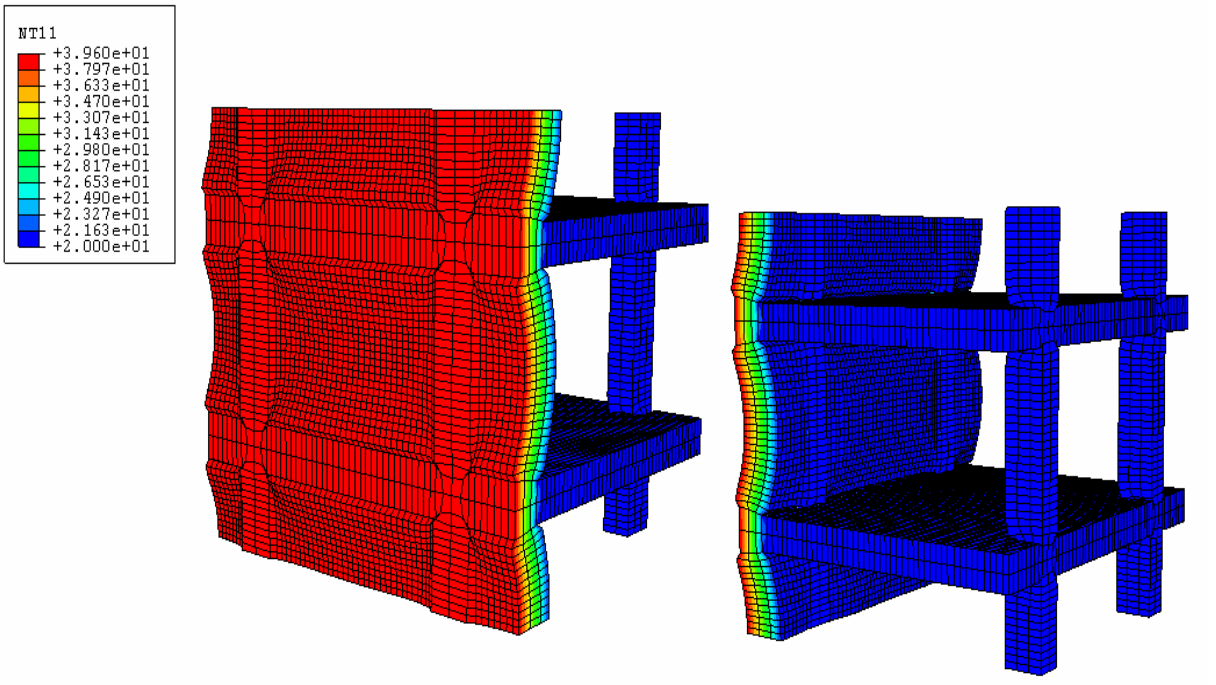


Fig. A1.15 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA6

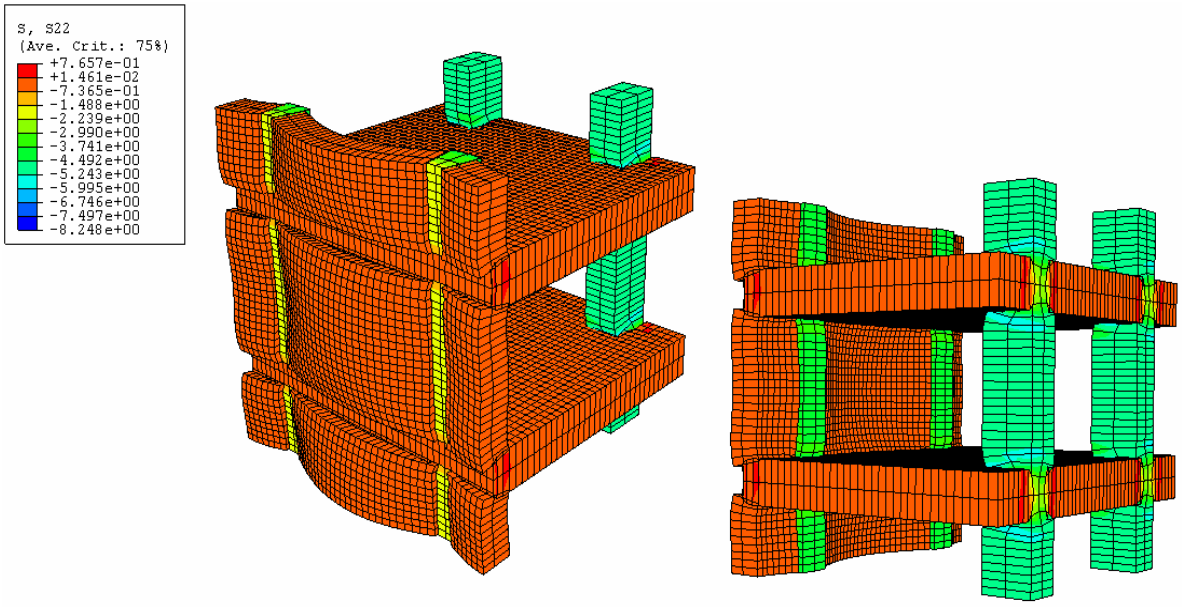


Fig. A1.16 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

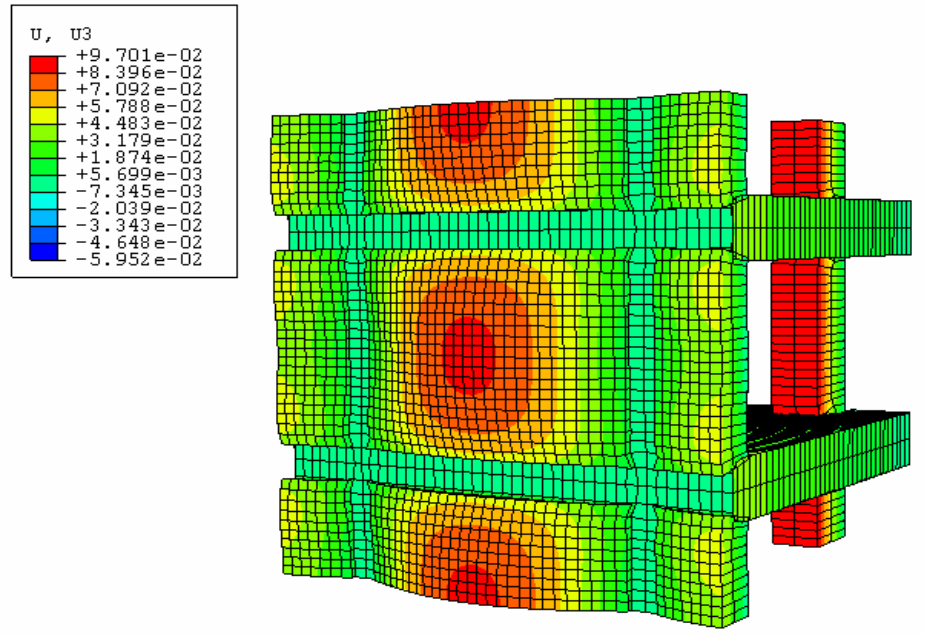


Fig. A1.17 – Deslocamentos máximos

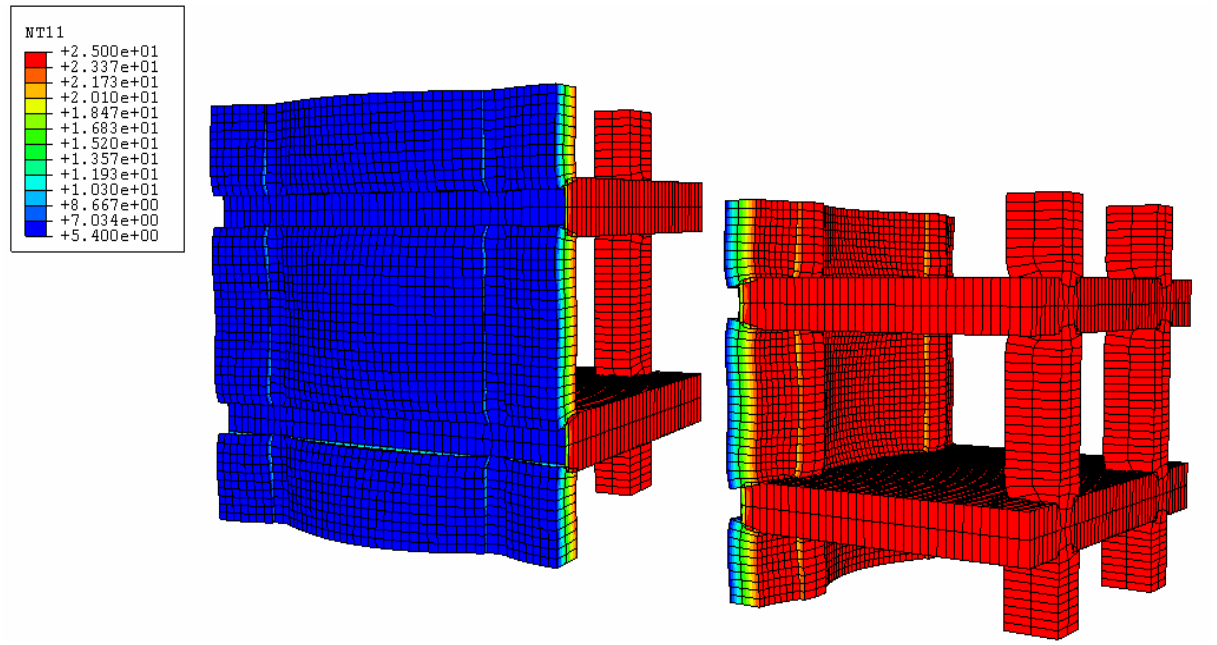


Fig. A1.18 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA7

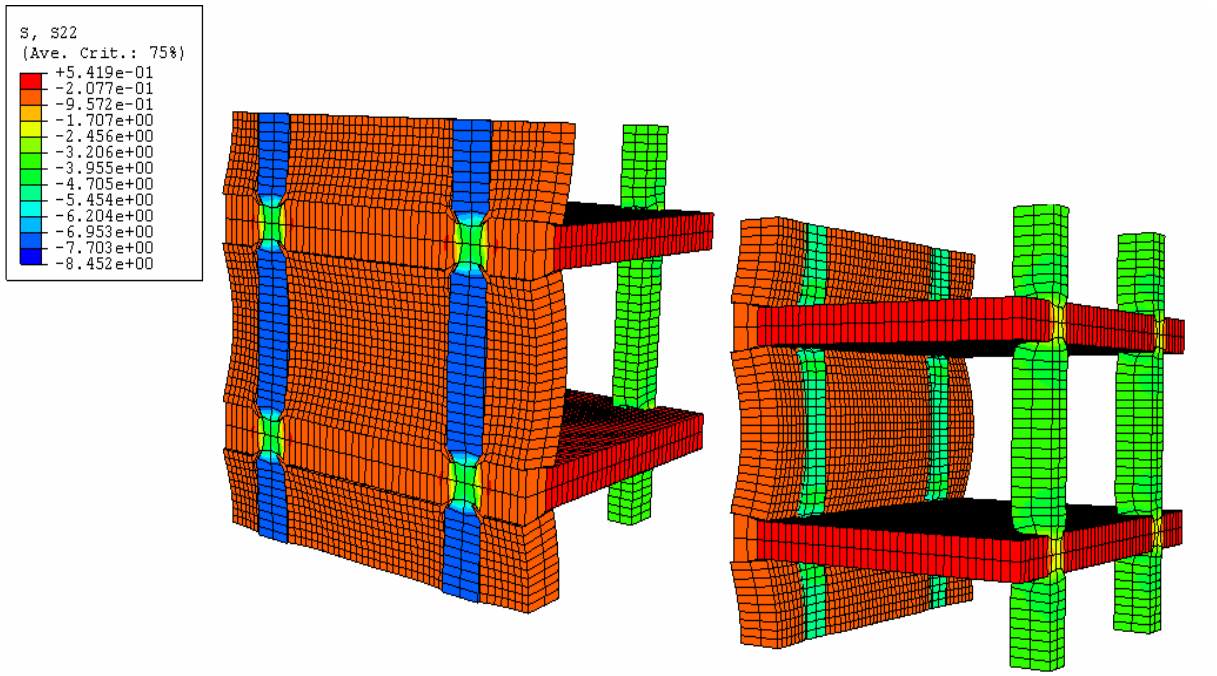


Fig. A1.19 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

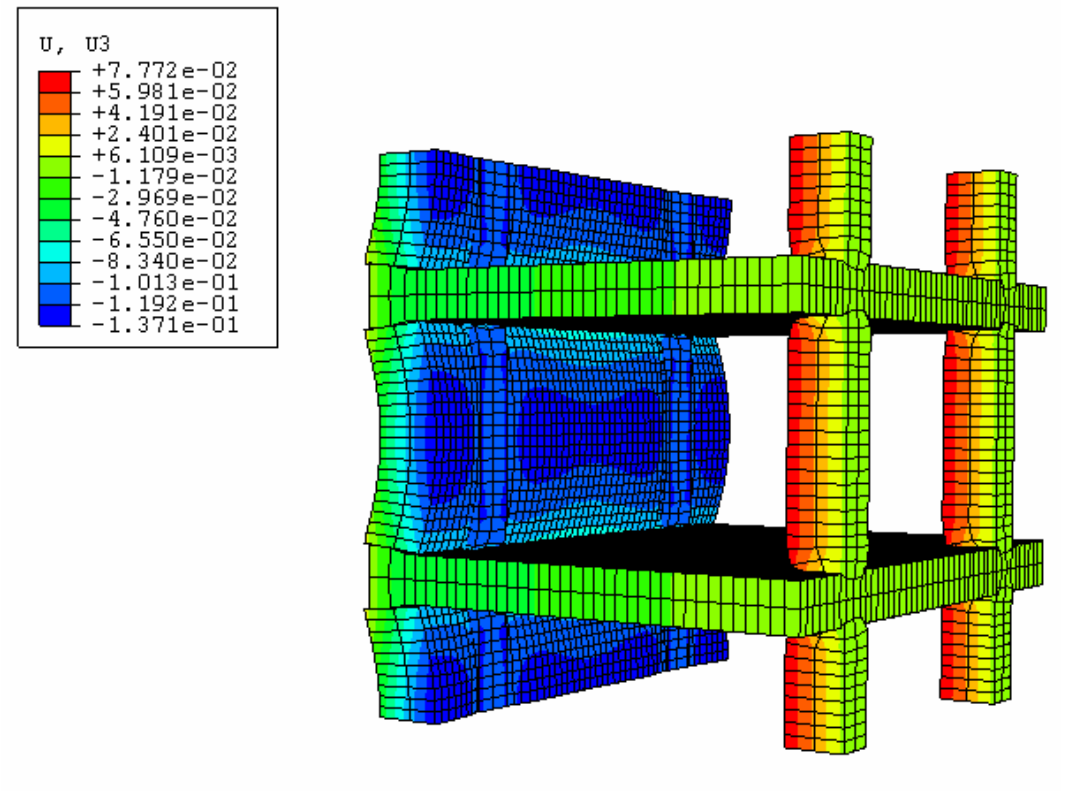


Fig. A1.20 – Deslocamentos máximos

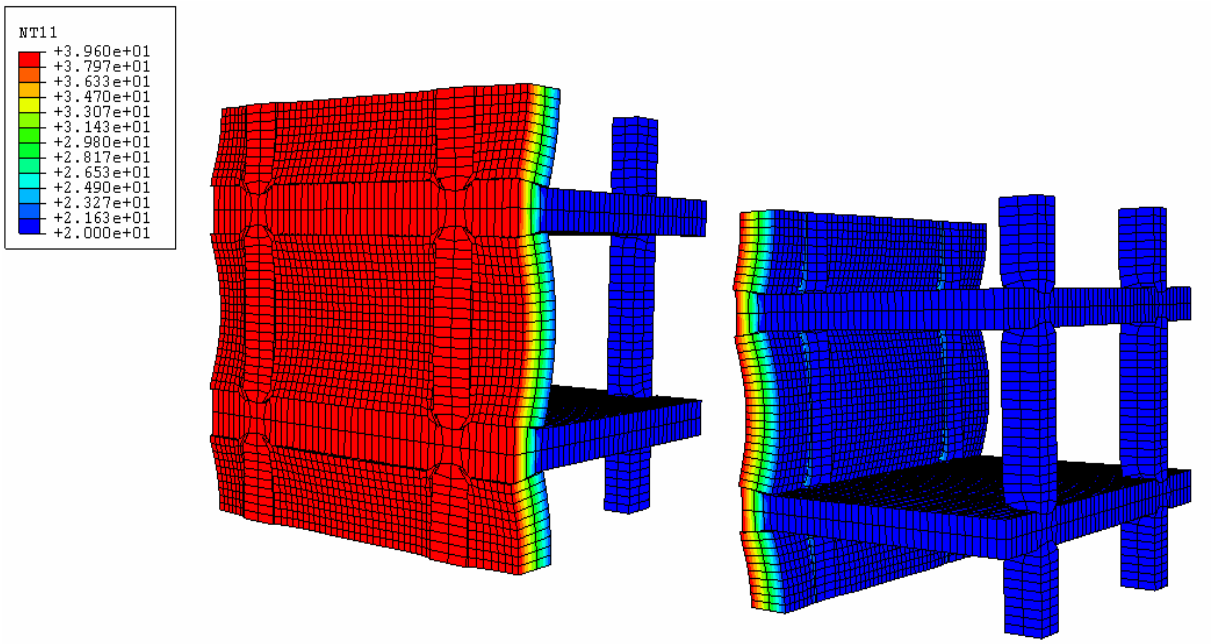


Fig. A1.21 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.8. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA8

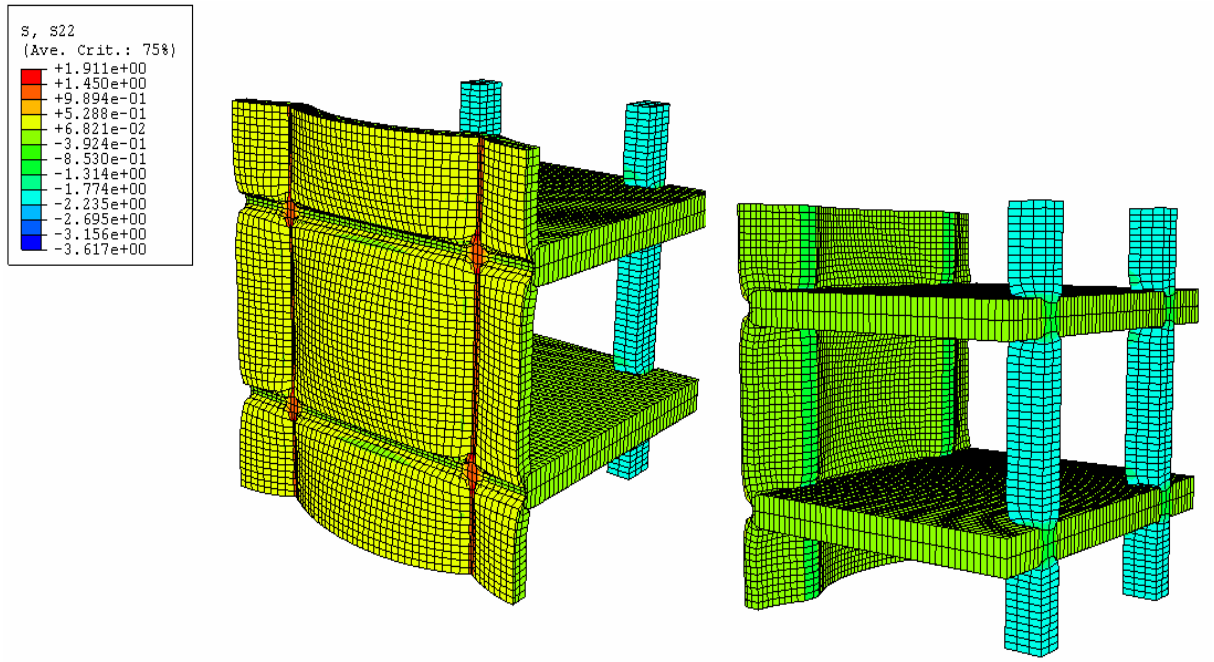


Fig. A1.22 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

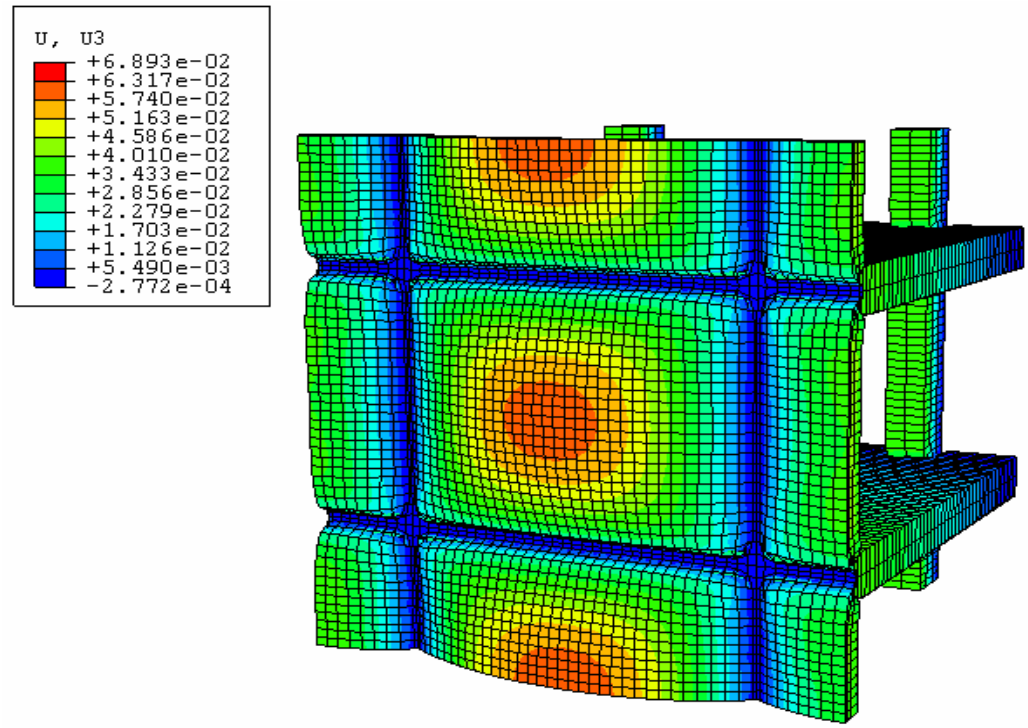


Fig. A1.23 – Deslocamentos máximos

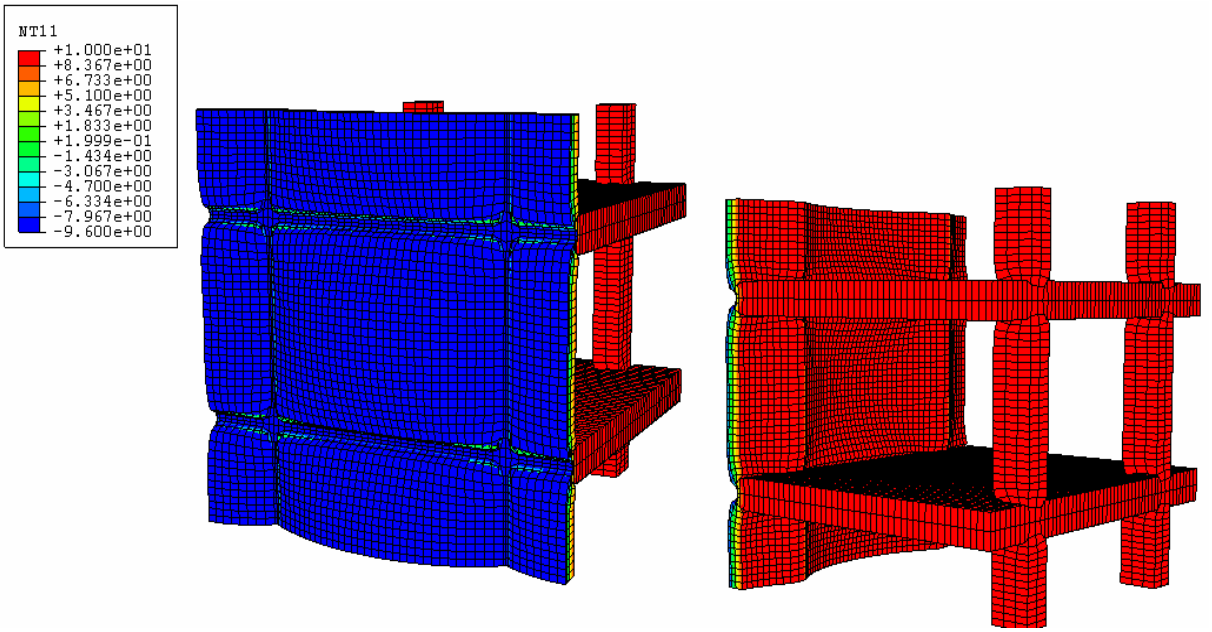


Fig. A1.24 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A1.2.9. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SA9

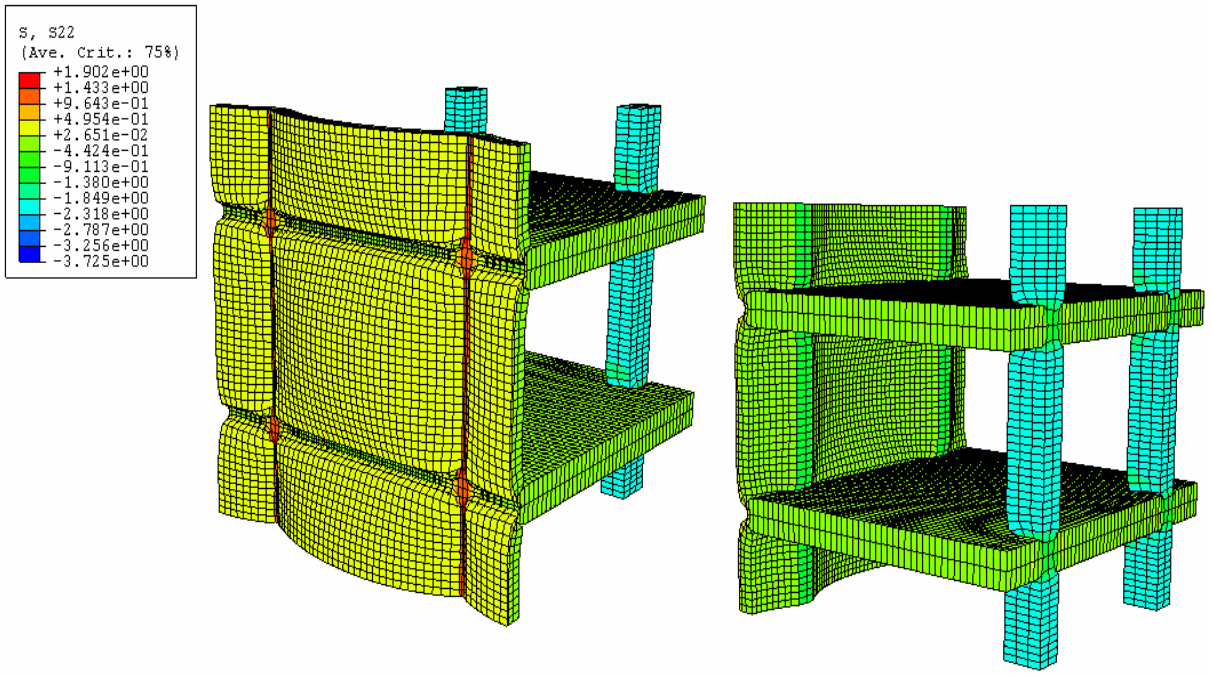


Fig. A1.25 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

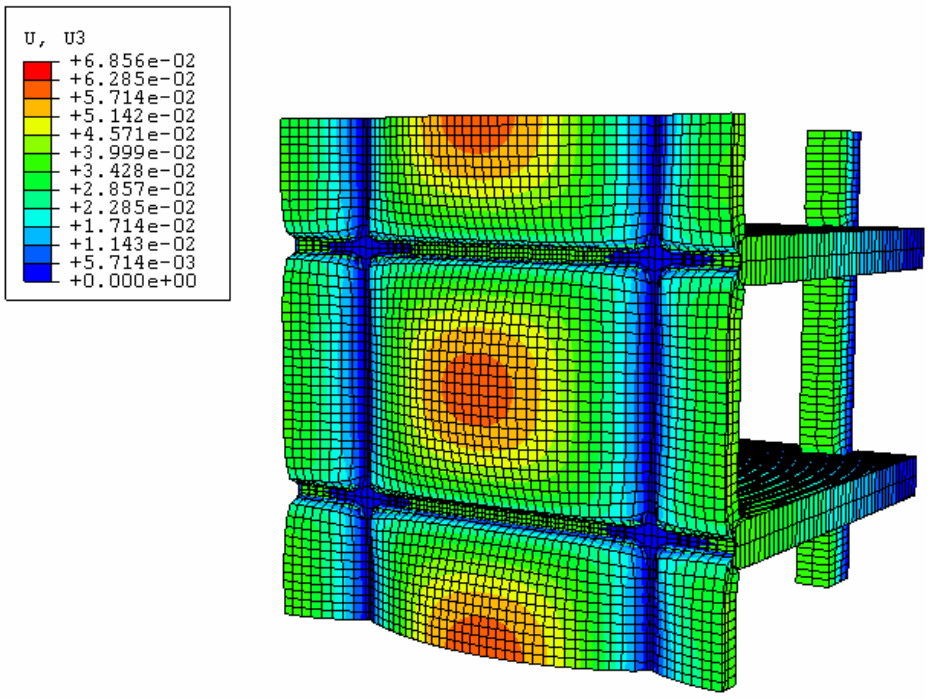


Fig. A1.26 – Deslocamentos máximos

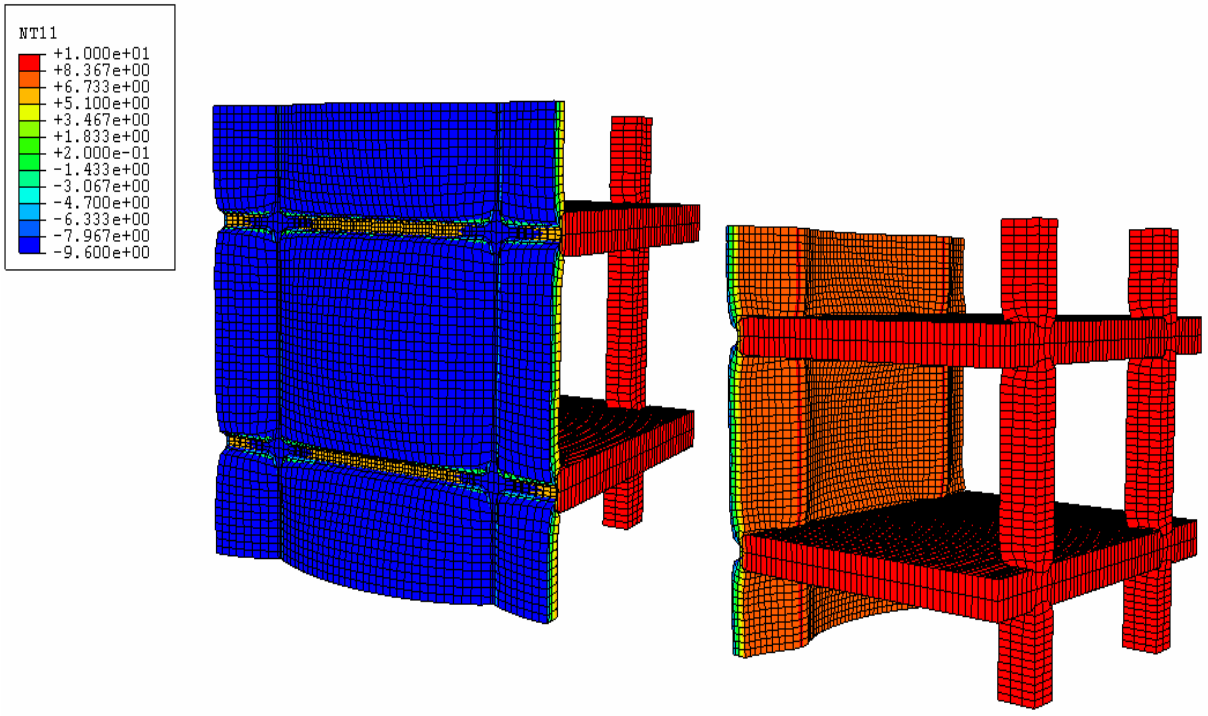


Fig. A1.27 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE SIMPLES COM ISOLAMENTO PELO EXTERIOR

A2.1. GENERALIDADES

Com o objectivo de ilustrar os resultados relativos à simulação numérica do comportamento da parede da envolvente do tipo parede simples com isolamento pelo exterior, quando sujeita a um gradiente de temperatura, apresentam-se neste Anexo 2, alguns exemplos de saídas gráficas fornecidas pelo programa *ABAQUS*.

A2.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A2.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB1

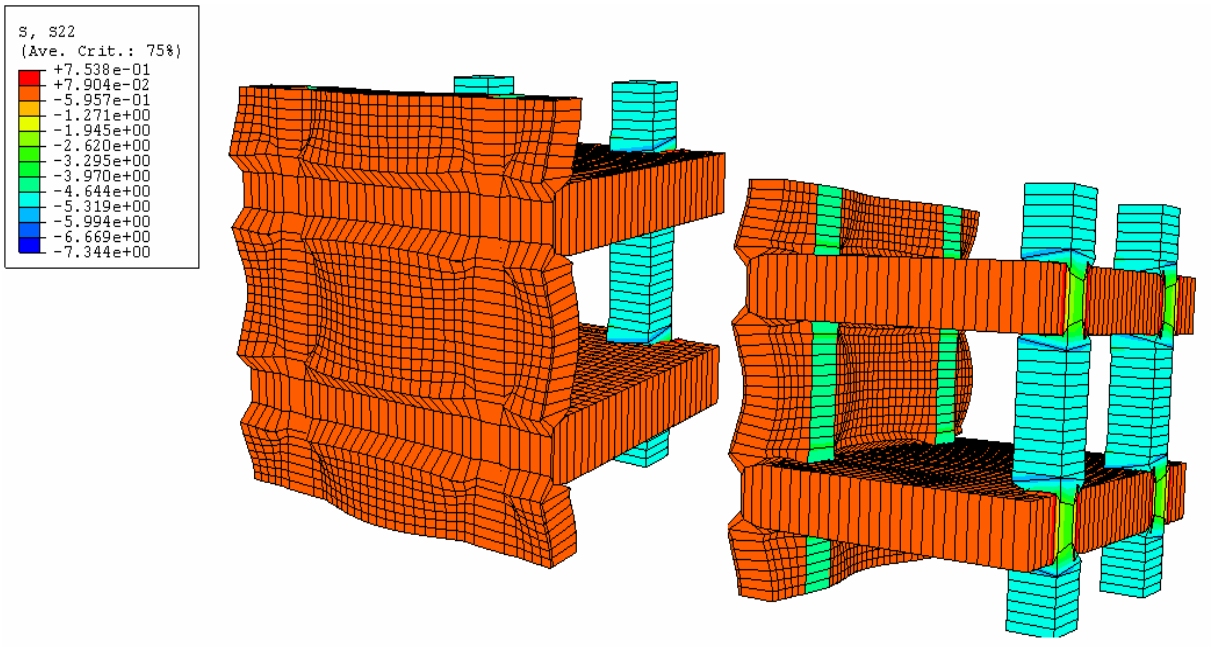


Fig. A2.1 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

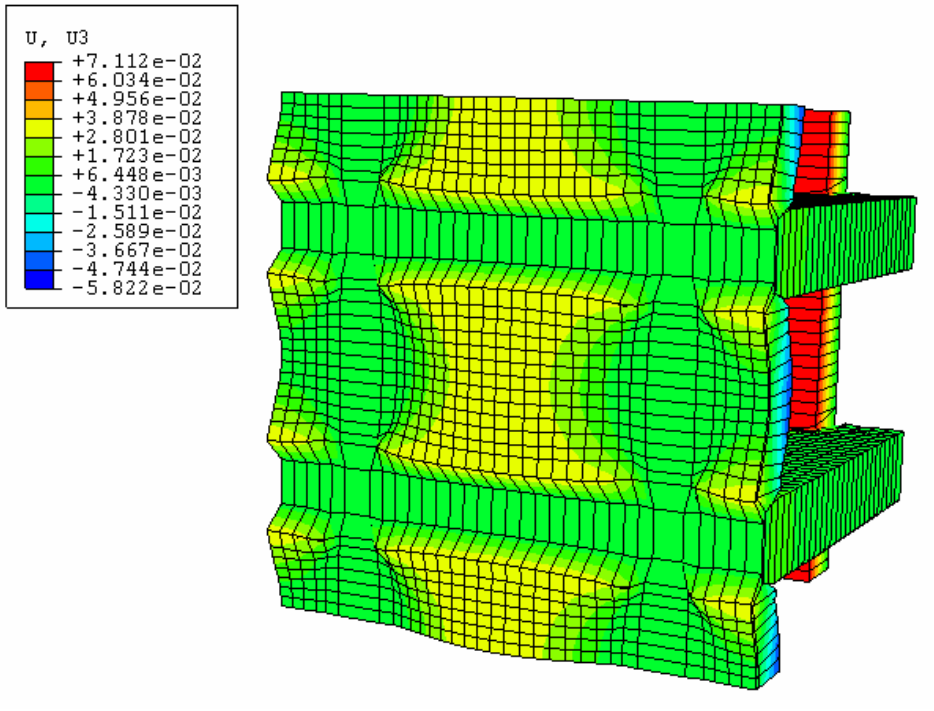


Fig. A2.2 – Deslocamentos máximos

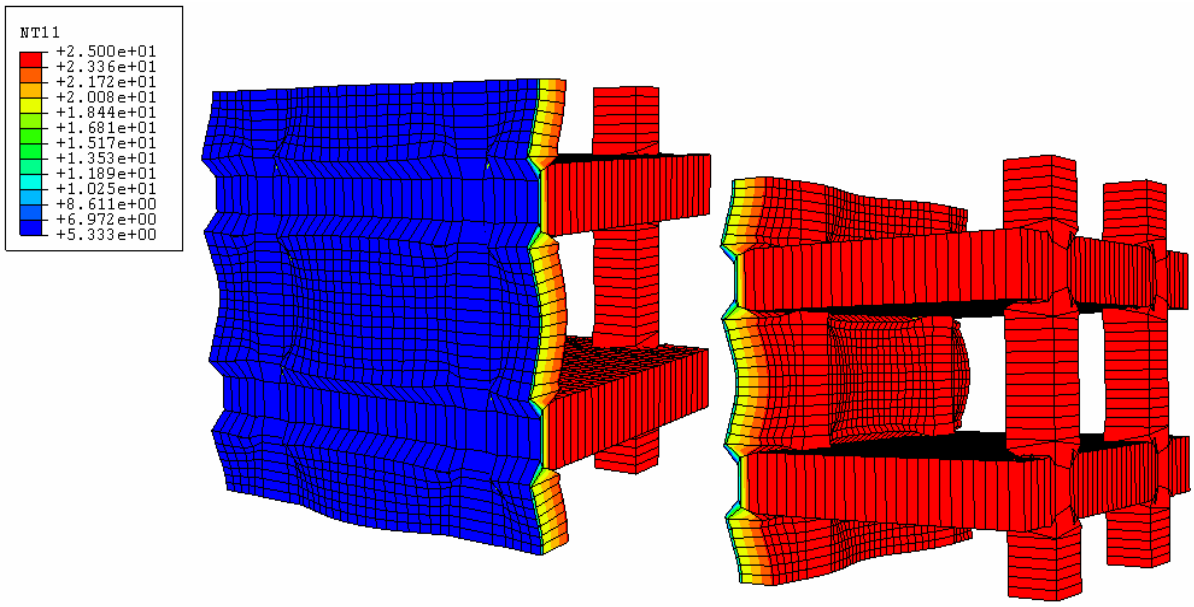


Fig. A2.3 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB2

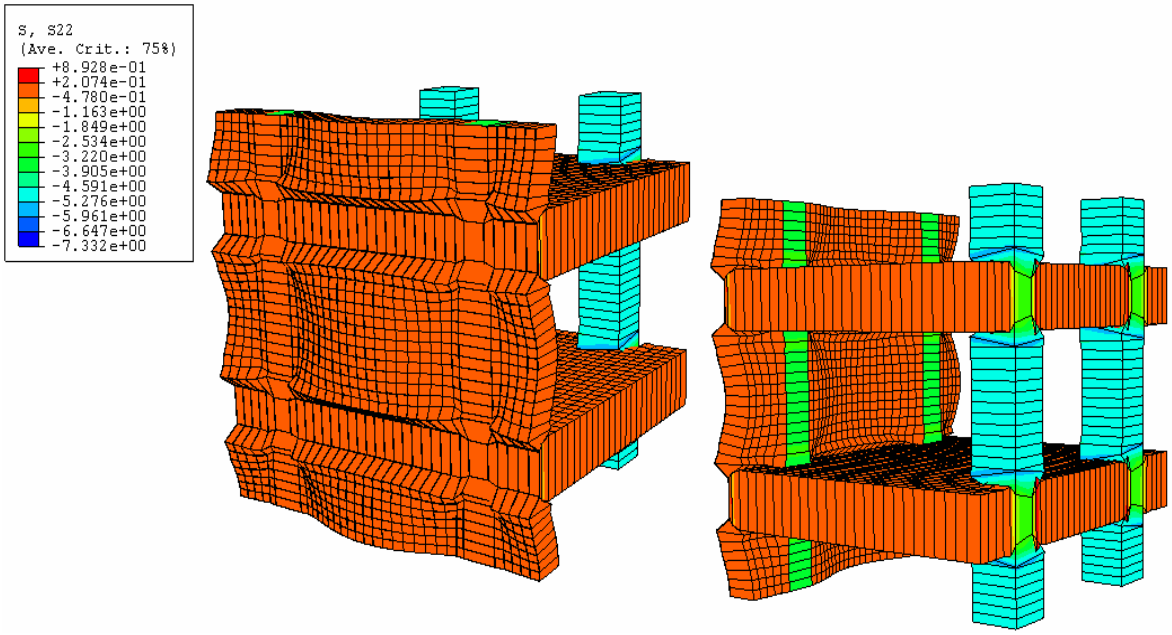


Fig. A2.4 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

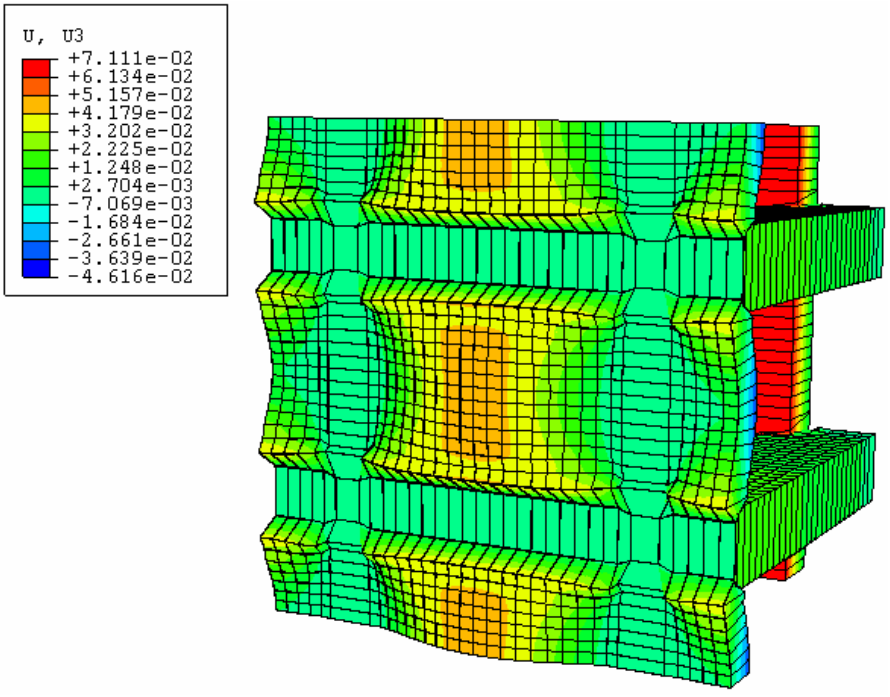


Fig. A2.5 – Deslocamentos máximos

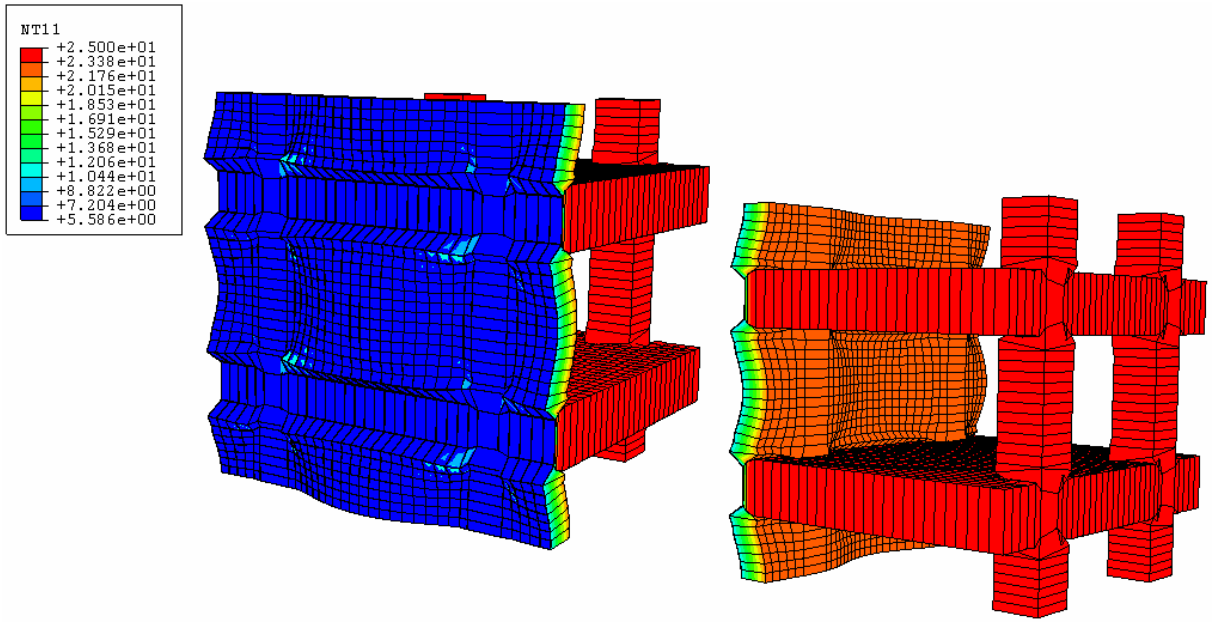


Fig. A2.6 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB3

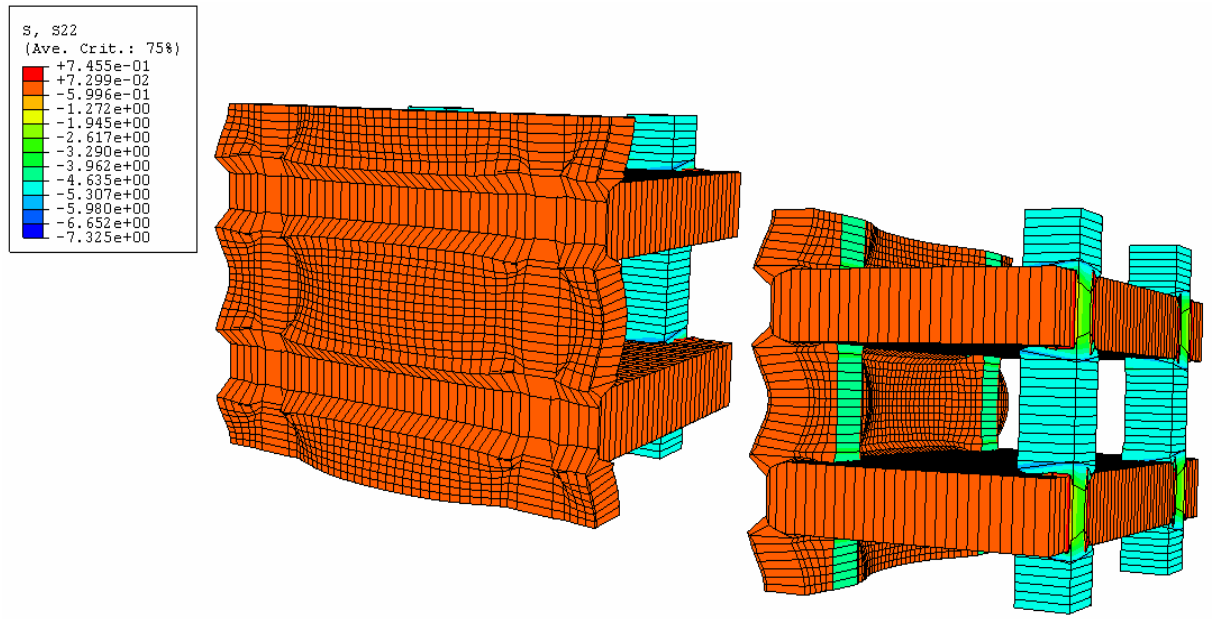


Fig. A2.7 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

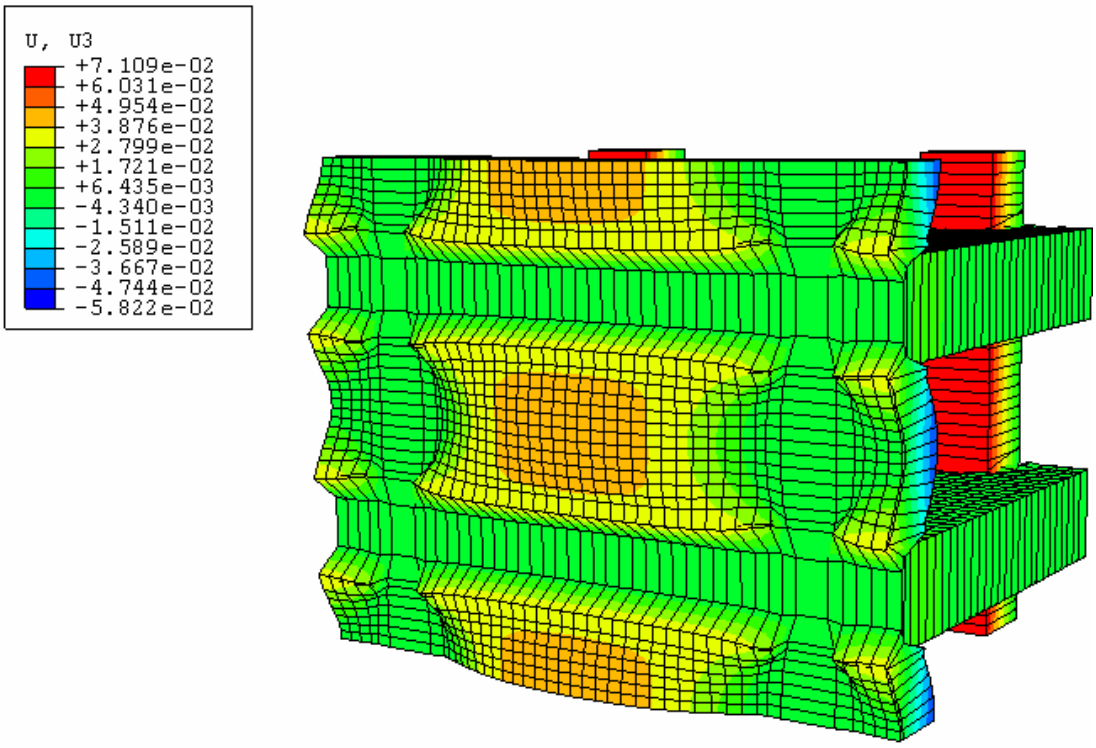


Fig. A2.8 – Deslocamentos máximos

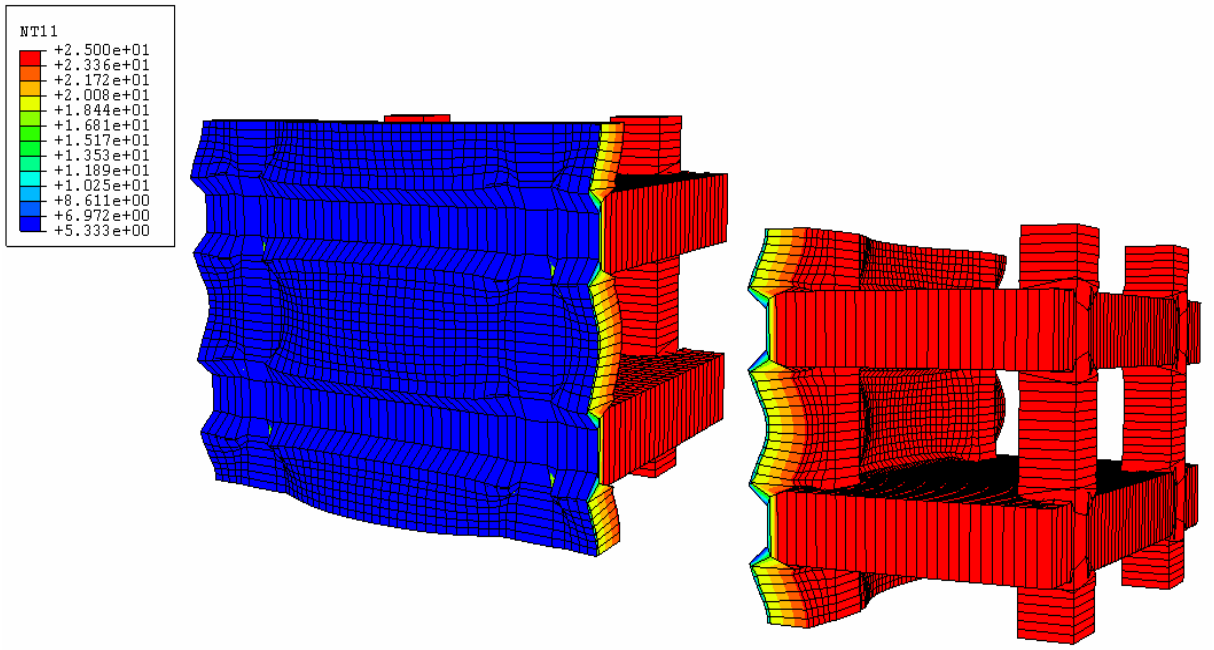


Fig. A2.9 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB4

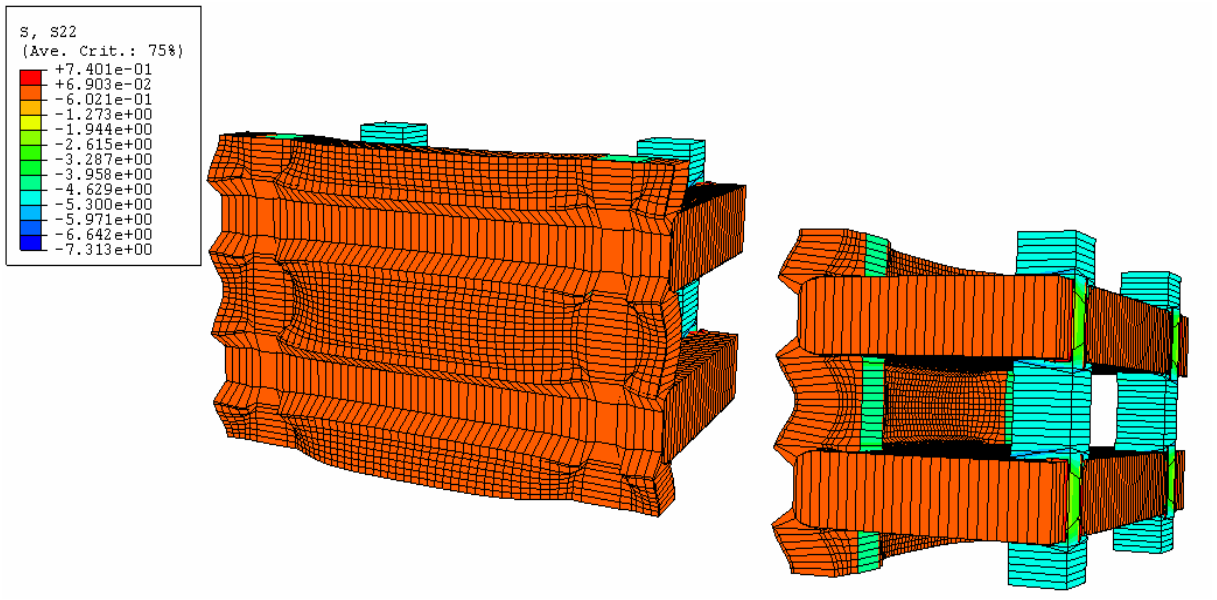


Fig. A2.10 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

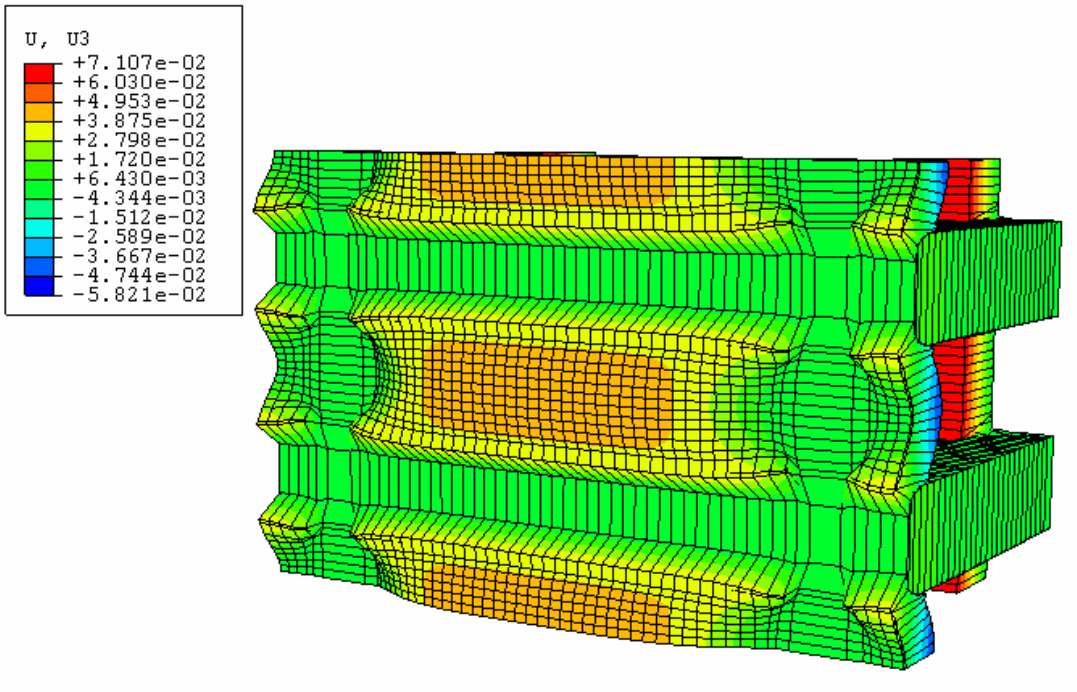


Fig. A2.11 – Deslocamentos máximos

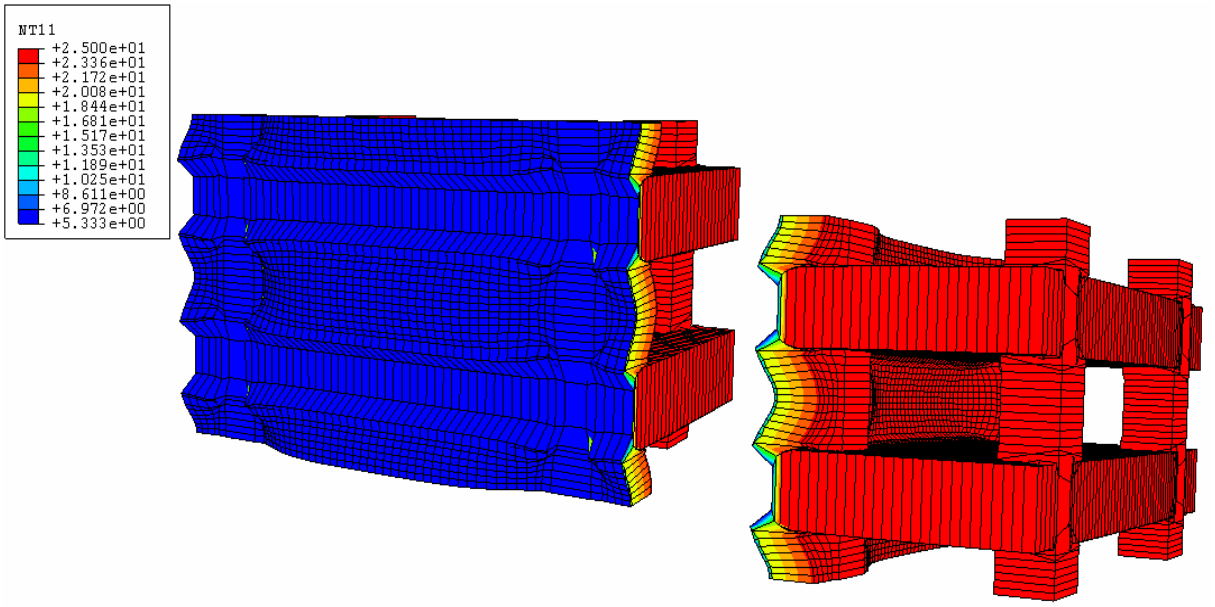


Fig. A2.12 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB5

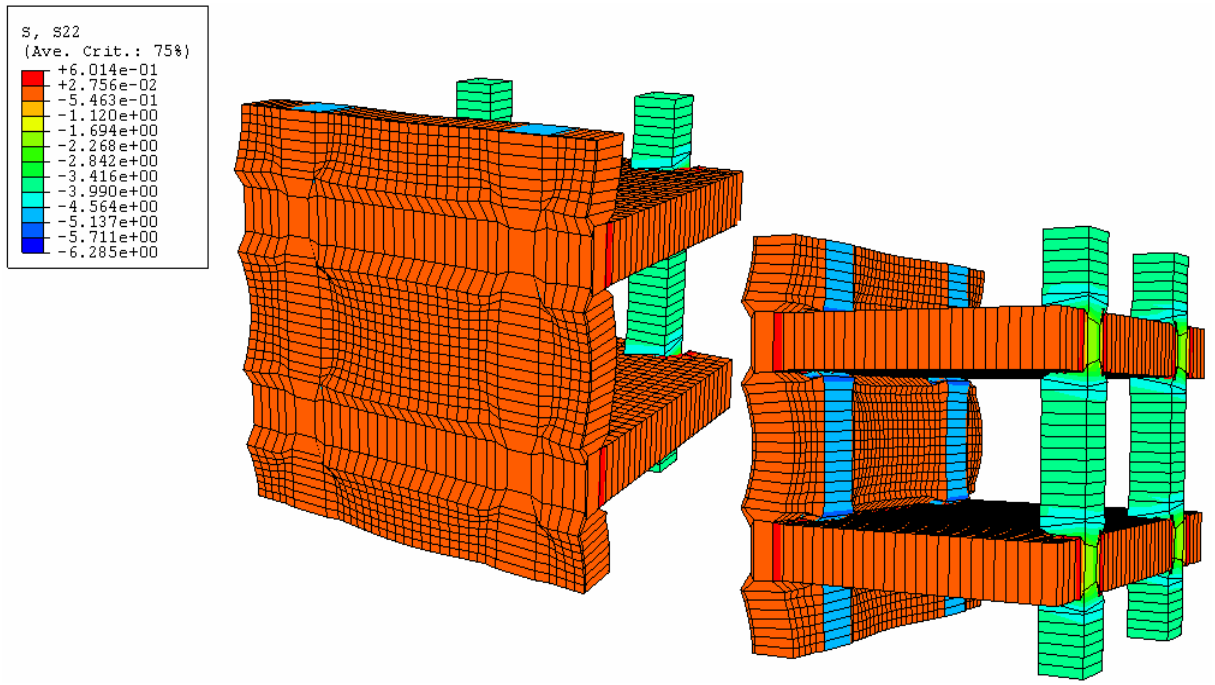


Fig. A2.13 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

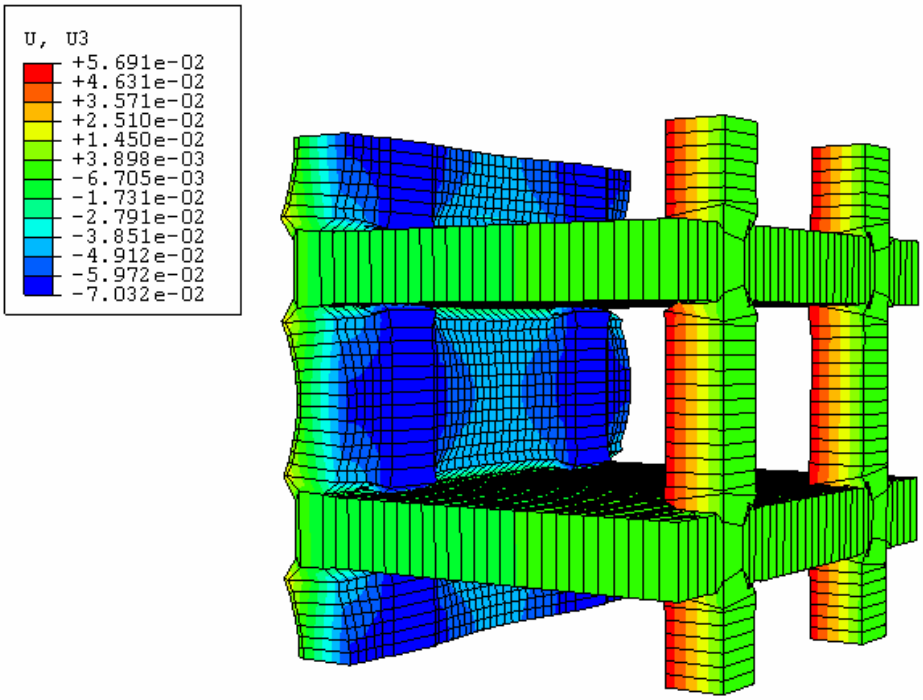


Fig. A2.14 – Deslocamentos máximos

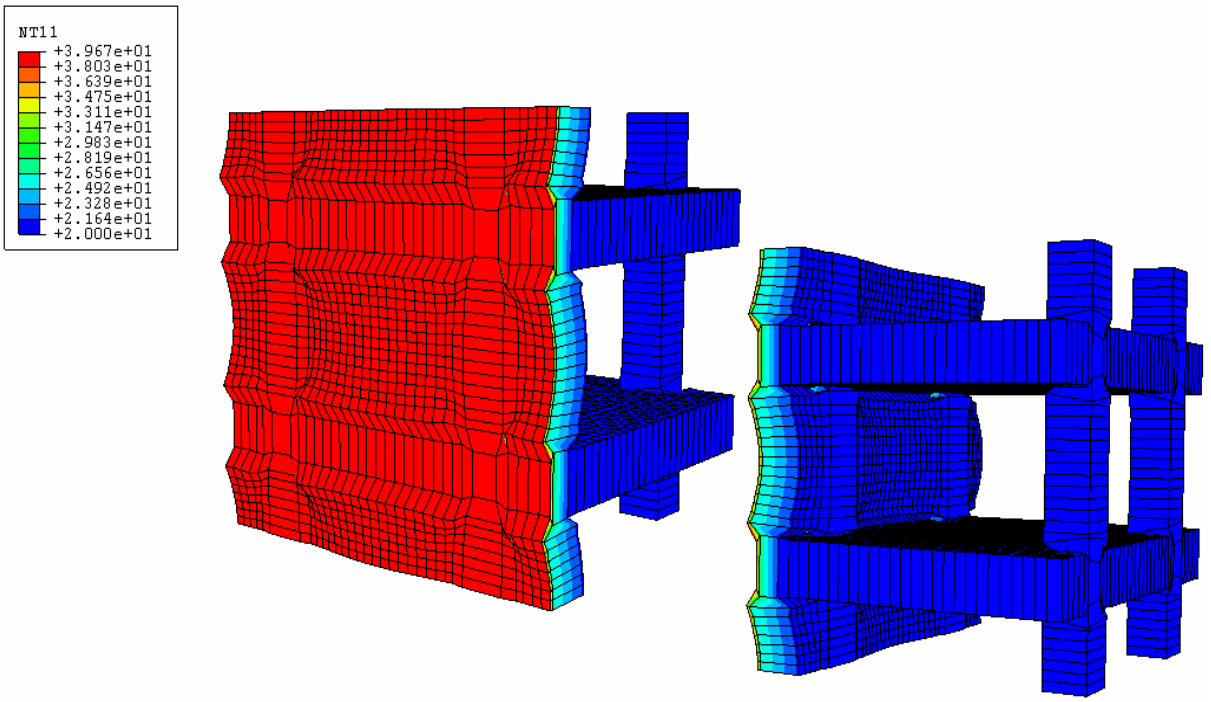


Fig. A2.15 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB6

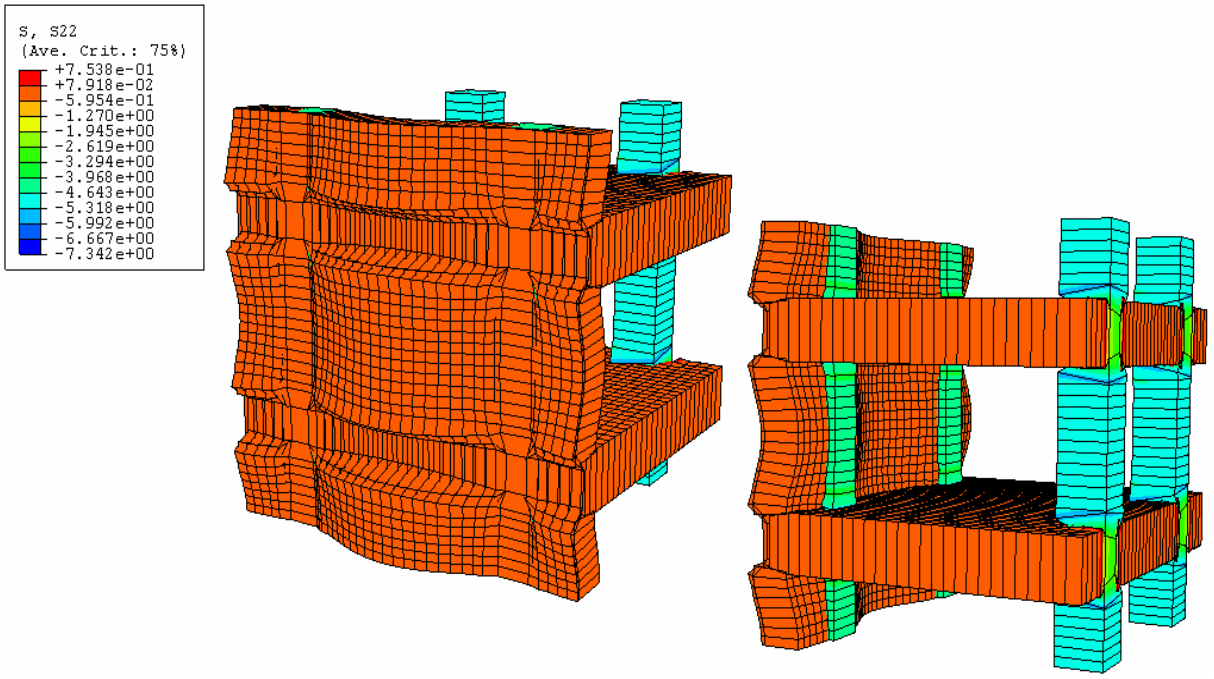


Fig. A2.16 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

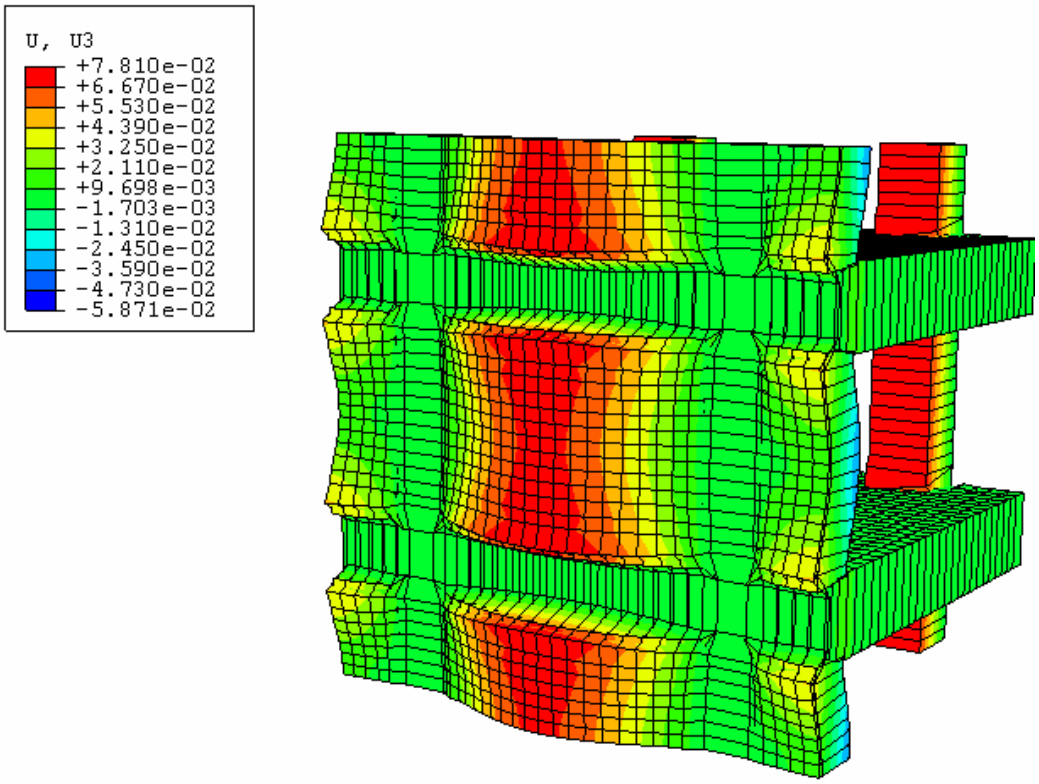


Fig. A2.17 – Deslocamentos máximos

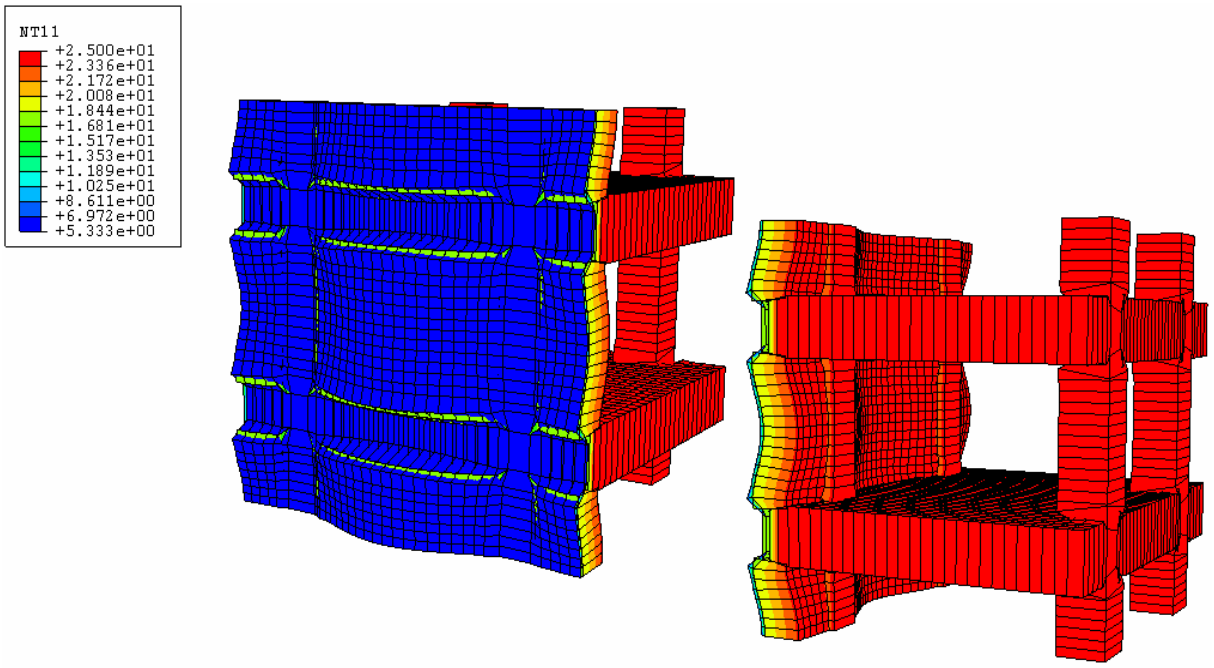


Fig. A2.18 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB7

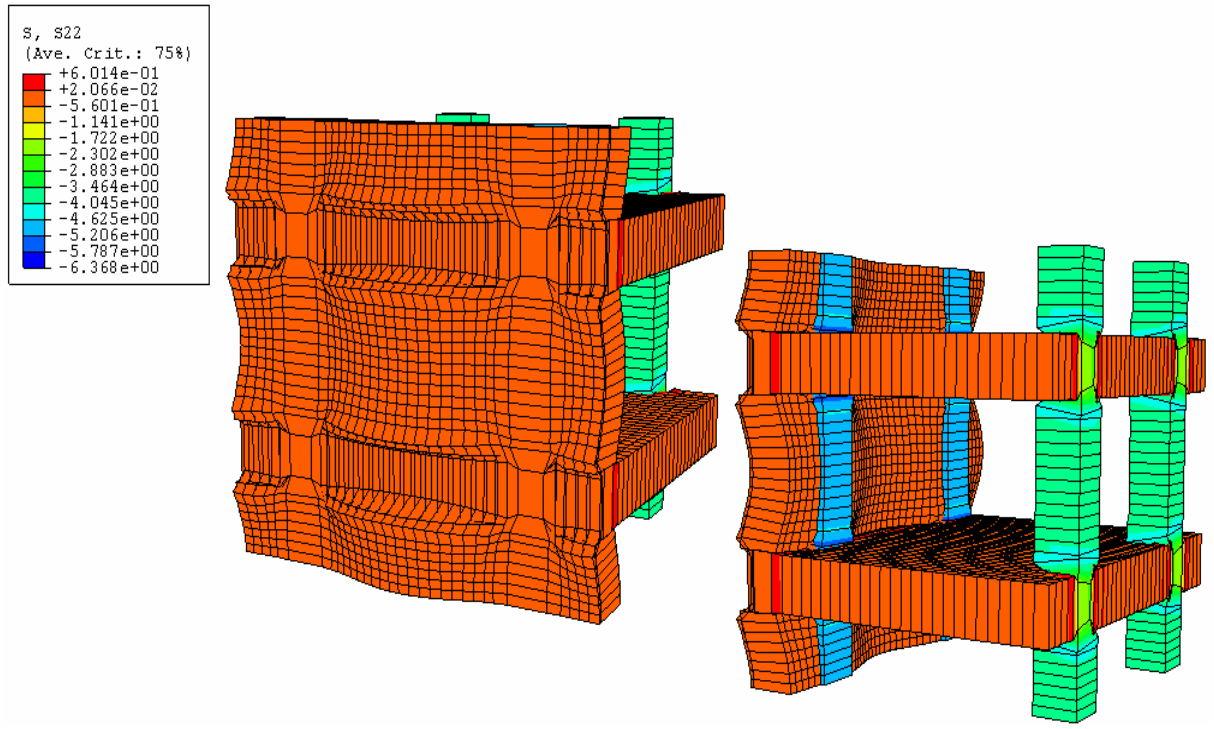


Fig. A2.19 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

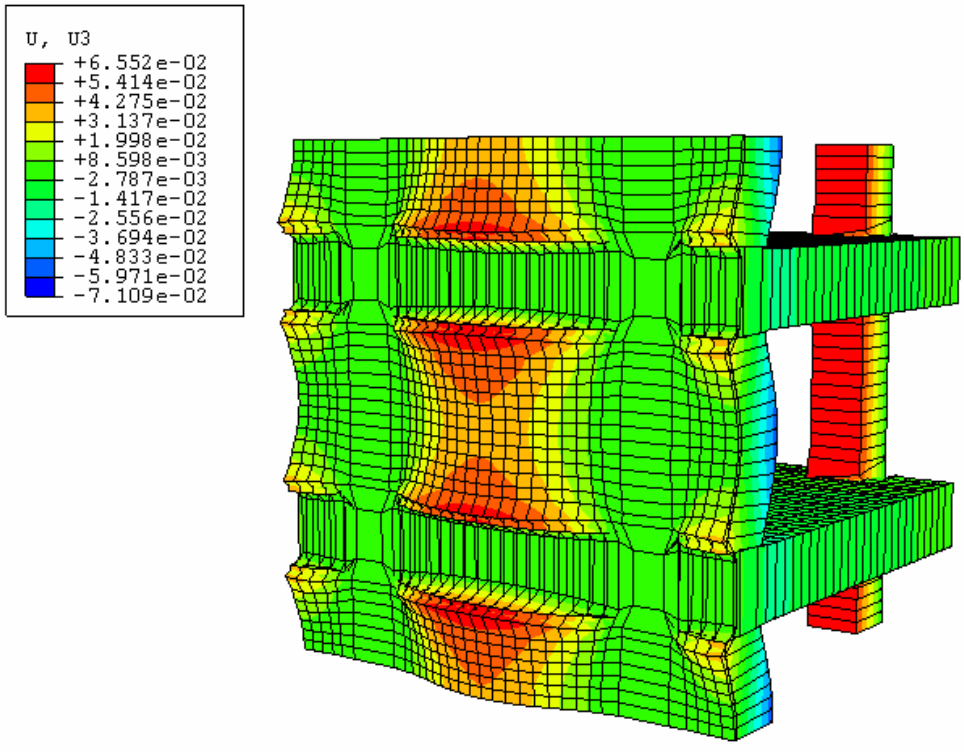


Fig. A2.20 – Deslocamentos máximos

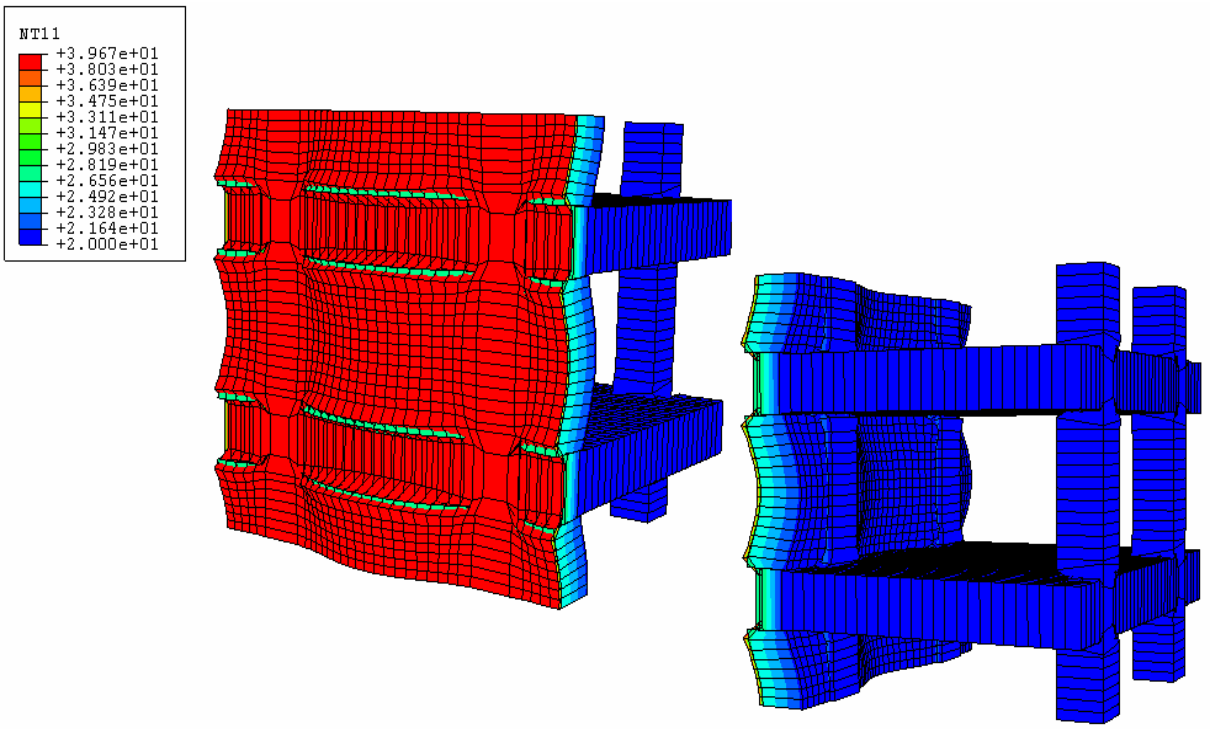


Fig. A2.21 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.8. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB8

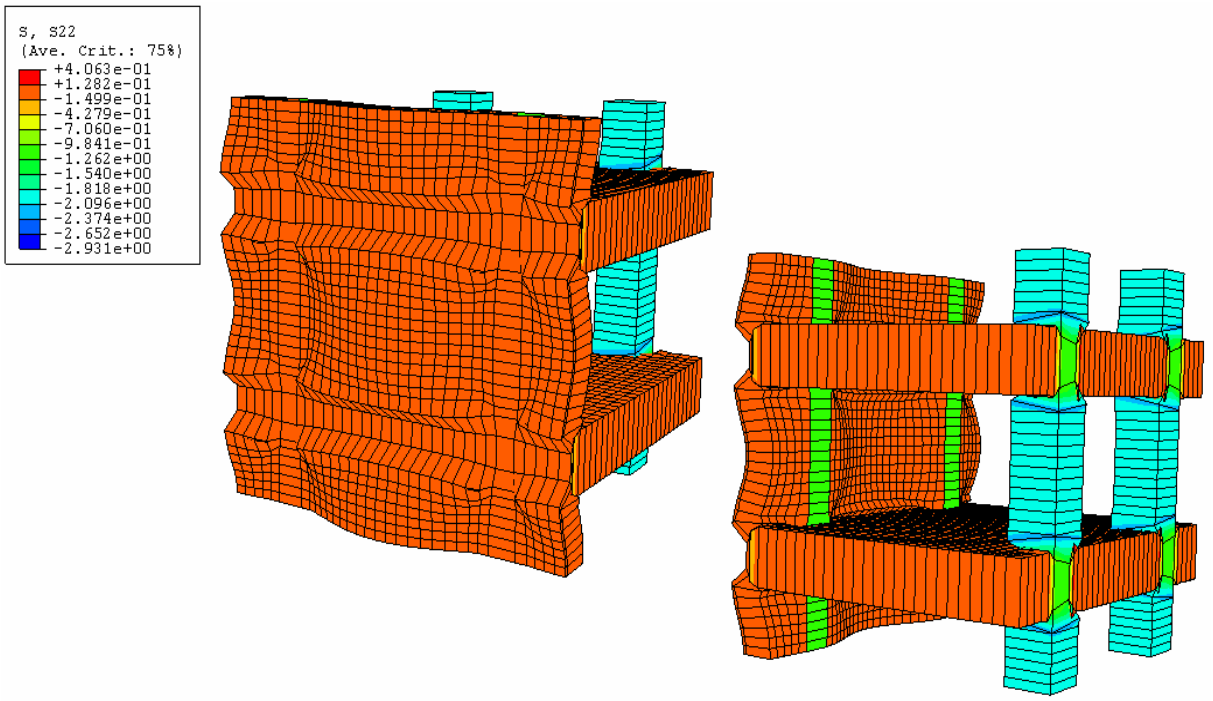


Fig. A2.22 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

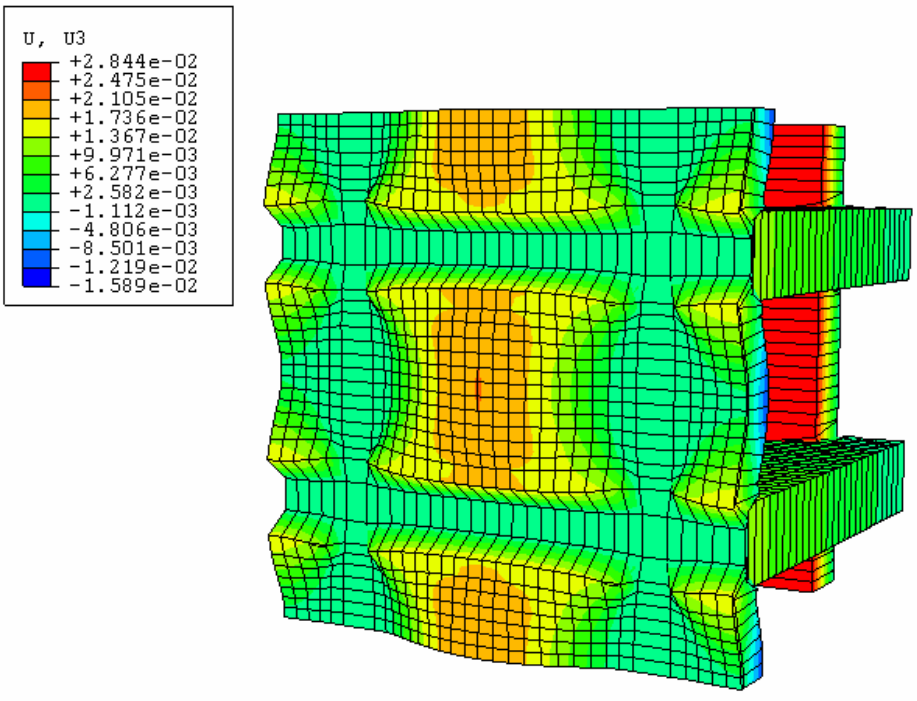


Fig. A2.23 – Deslocamentos máximos

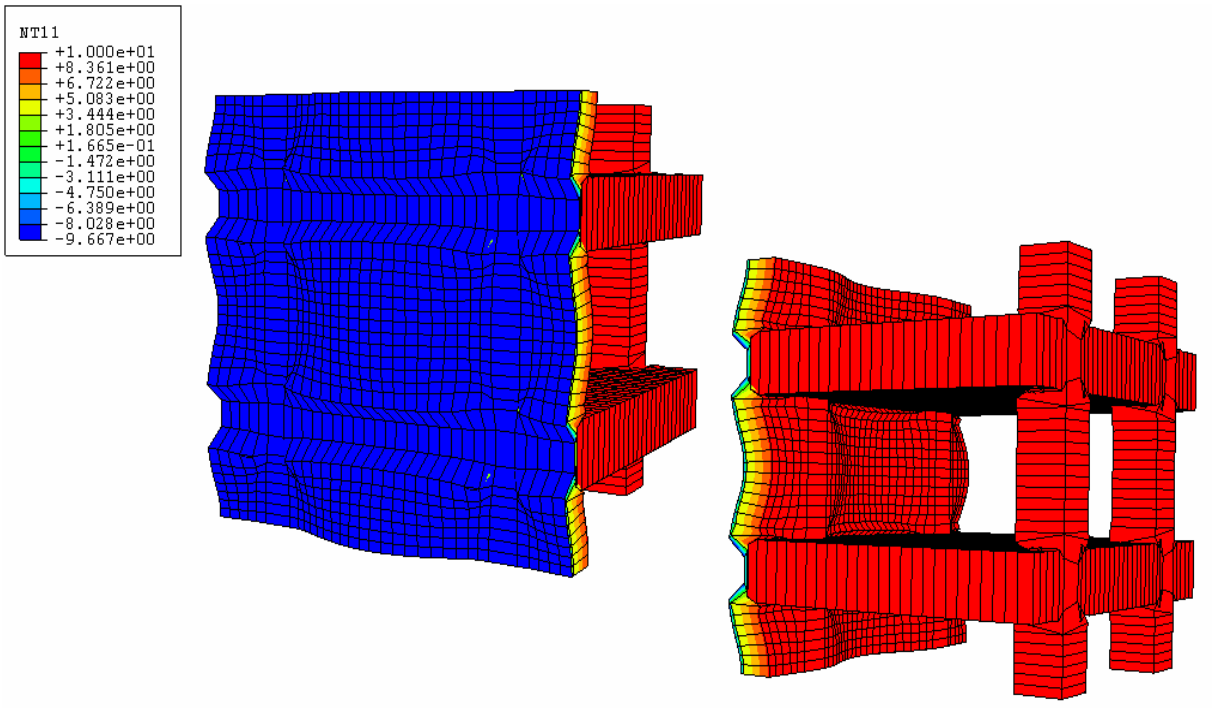


Fig. A2.24 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A2.2.9. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SB9

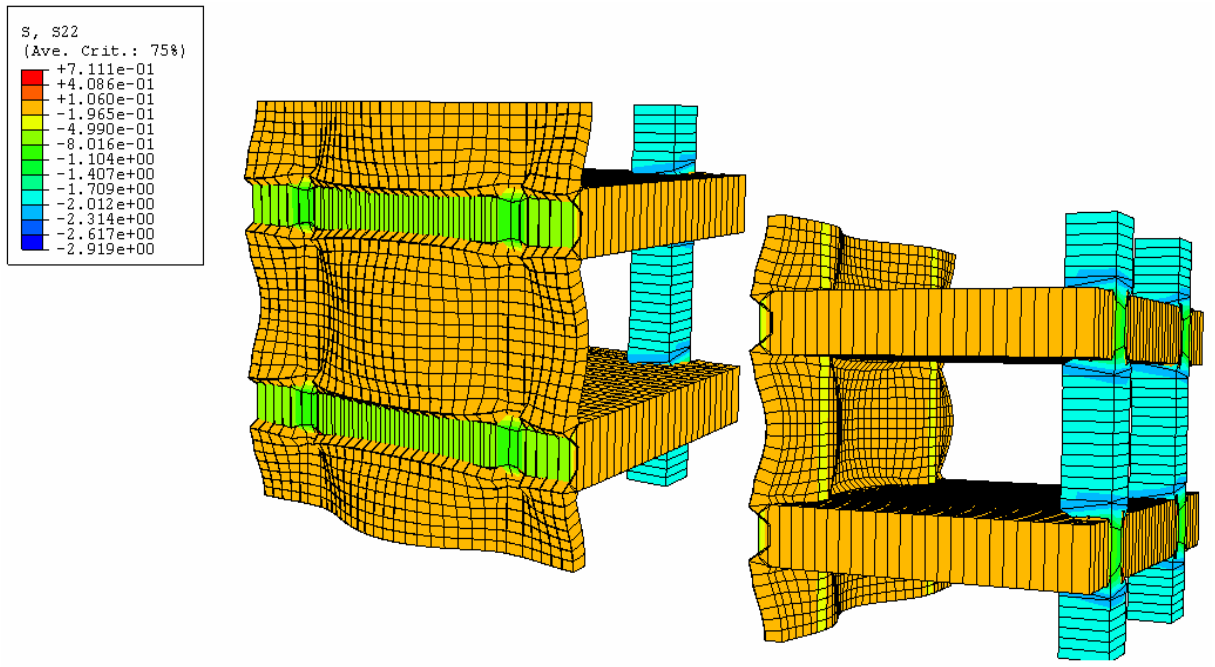


Fig. A2.25 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

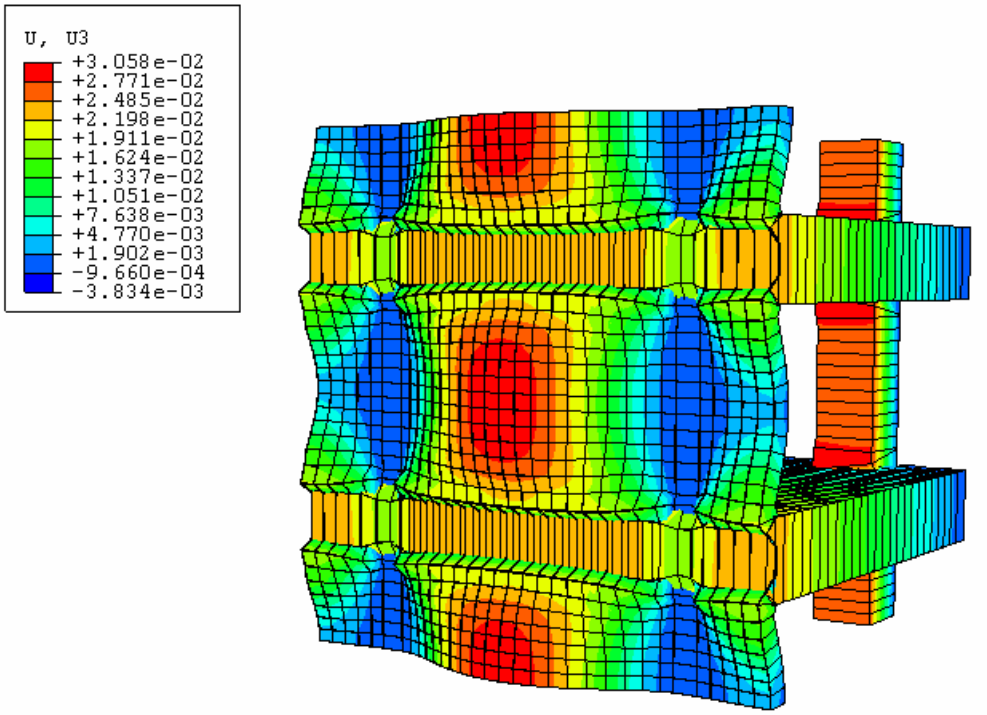


Fig. A2.26 – Deslocamentos máximos

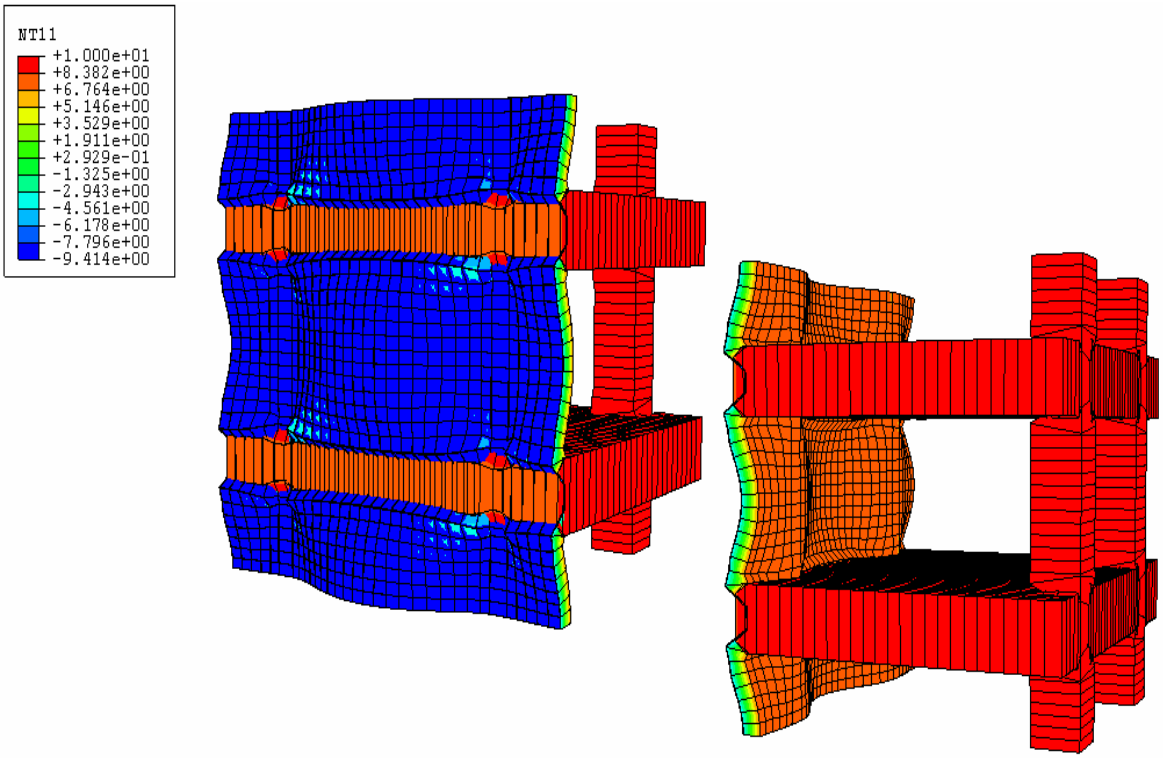


Fig. A2.27 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3

VISUALIZAÇÃO DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PAREDE DUPLA

A3.1. GENERALIDADES

Com o objectivo de ilustrar os resultados relativos à simulação numérica do comportamento da parede da envolvente do tipo parede dupla, quando sujeita a um gradiente de temperatura, apresentam-se neste Anexo 3, alguns exemplos de saídas gráficas fornecidas pelo programa *ABAQUS*.

A3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A3.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC1

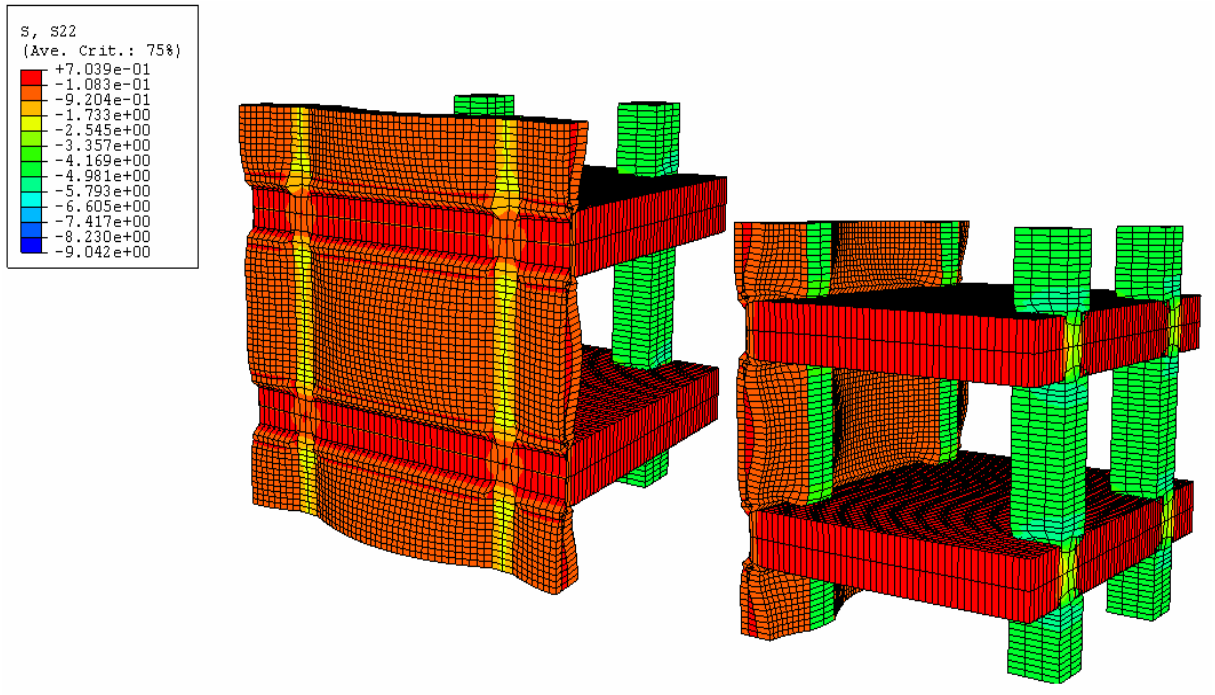


Fig. A3.1 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

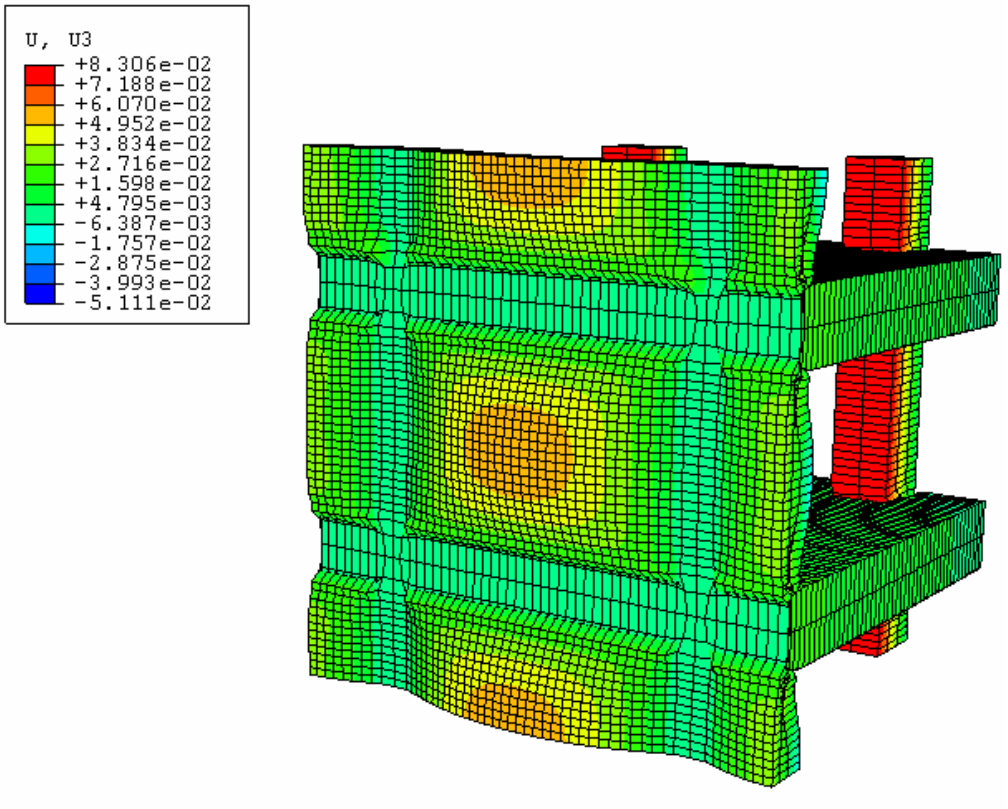


Fig. A3.2 – Deslocamentos máximos

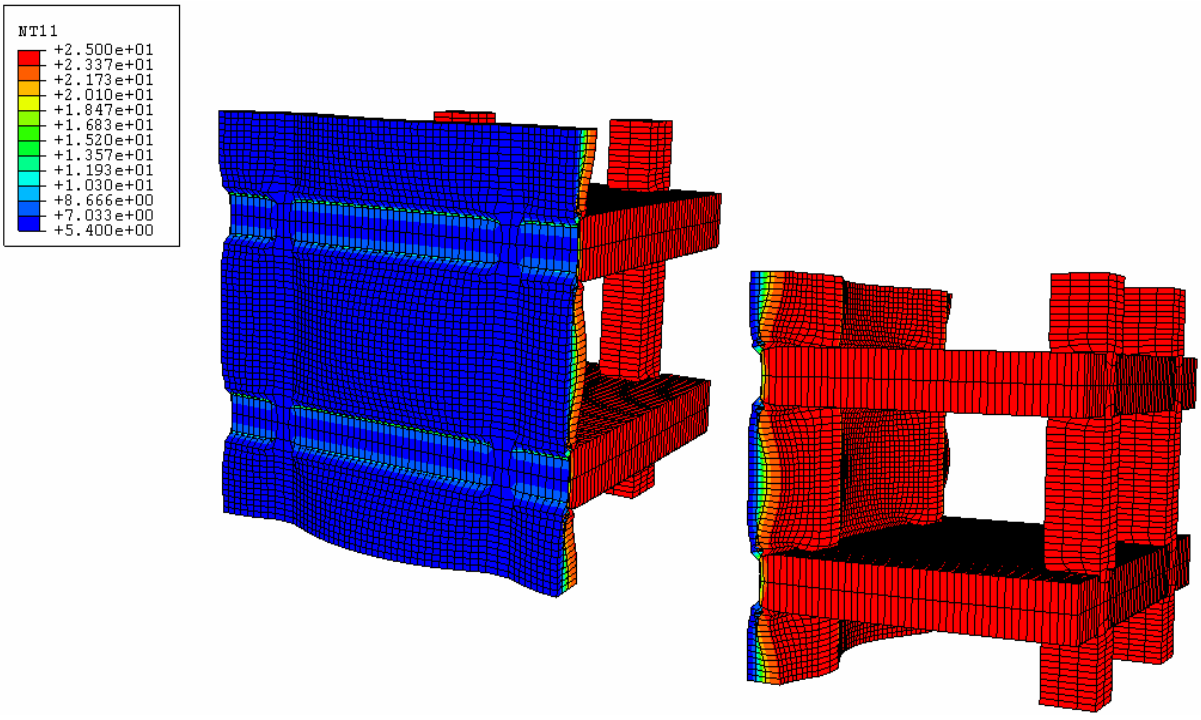


Fig. A3.3 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC2

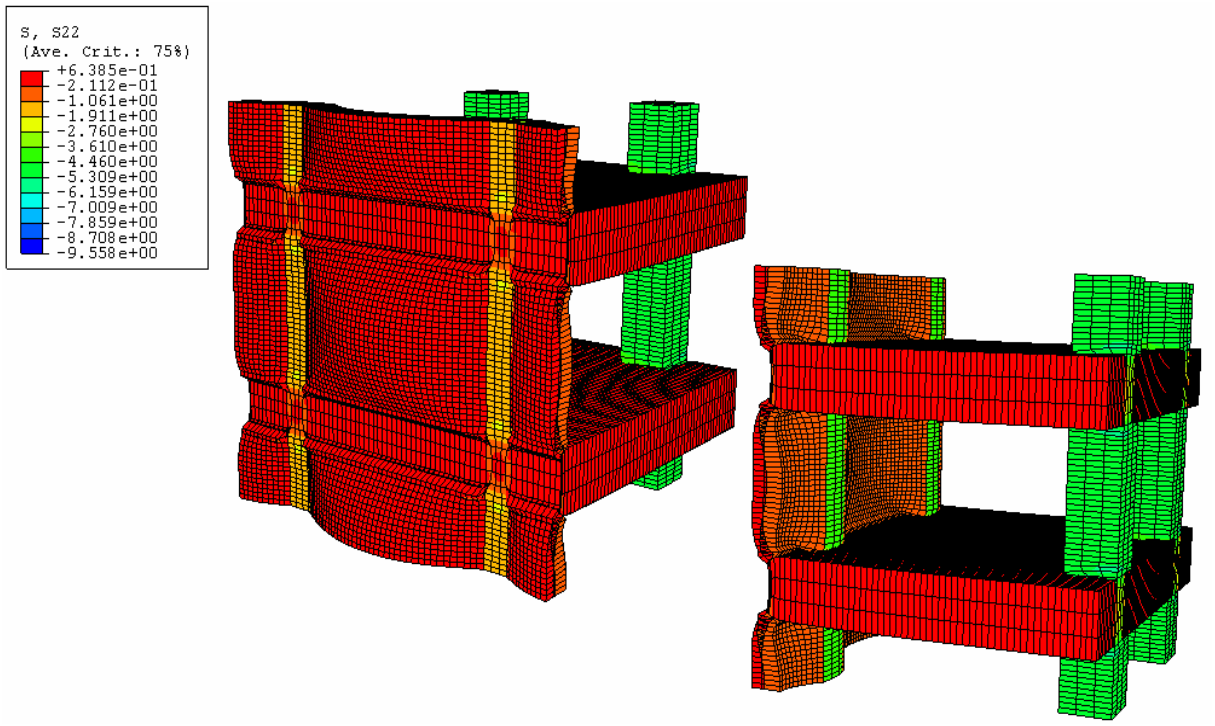


Fig. A3.4 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

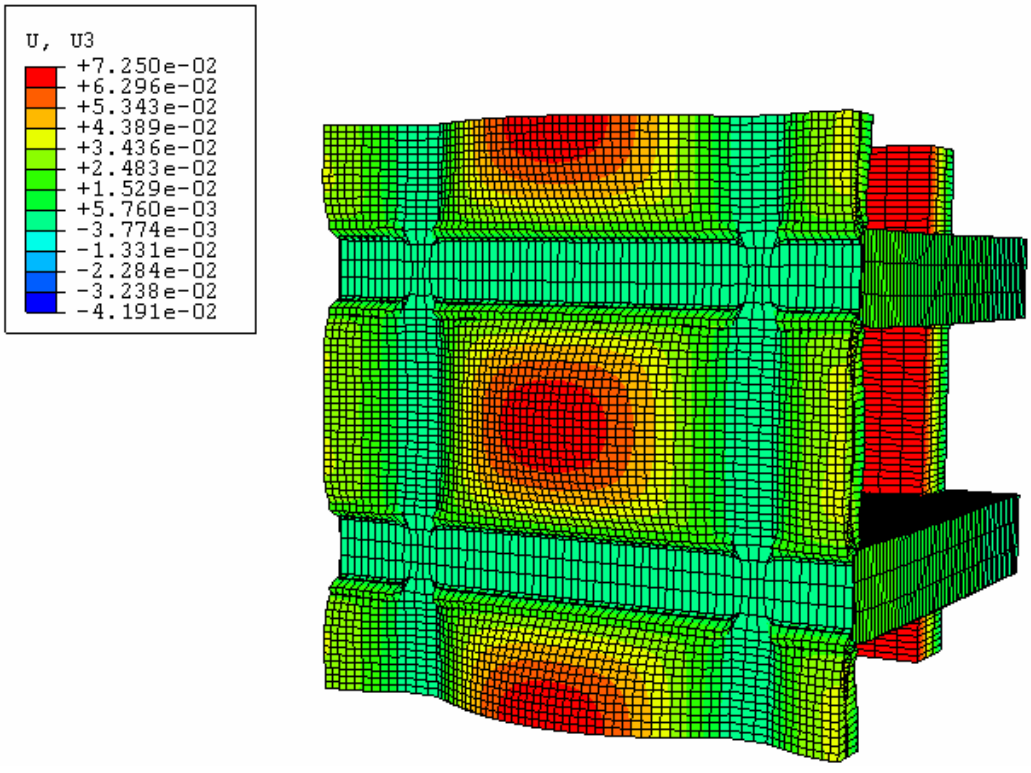


Fig. A3.5 – Deslocamentos máximos

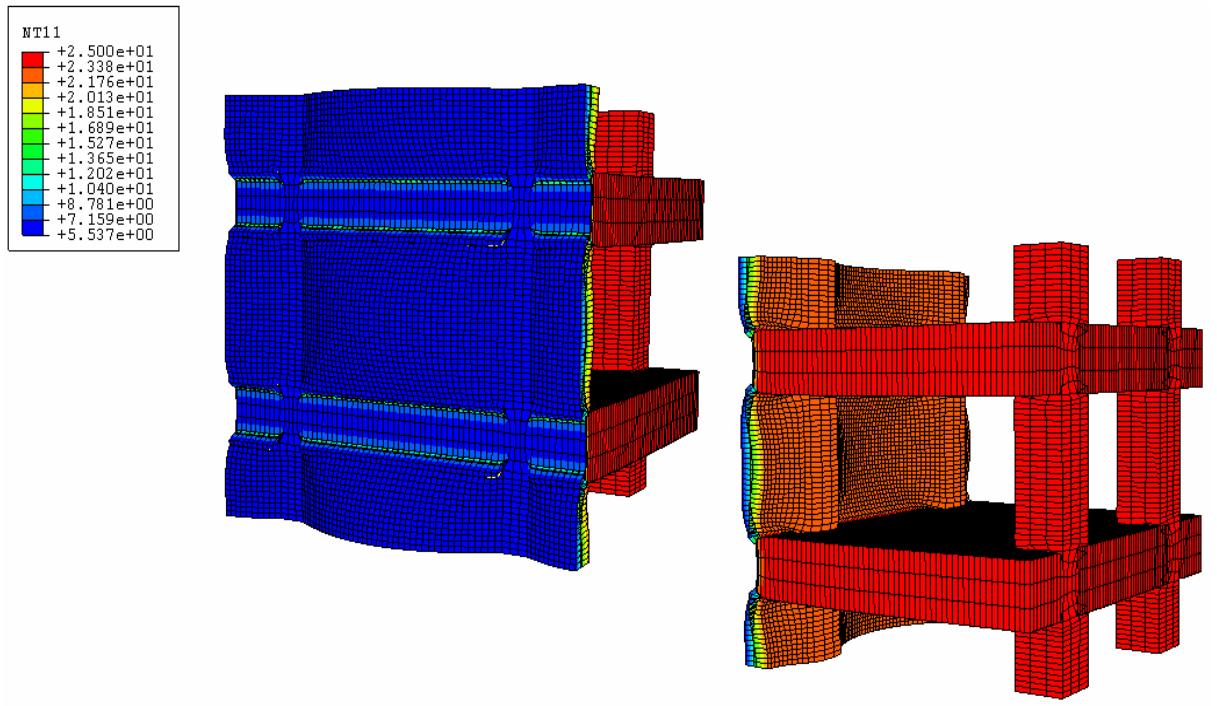


Fig. A3.6 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3.2.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC3

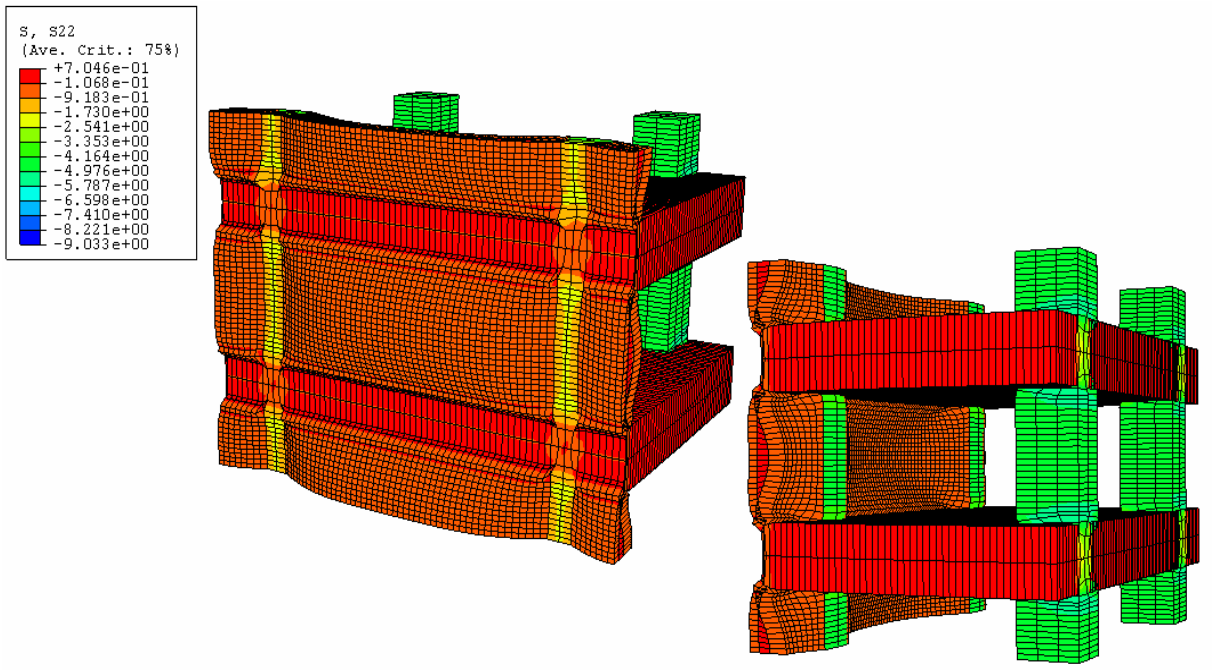


Fig. A3.7 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

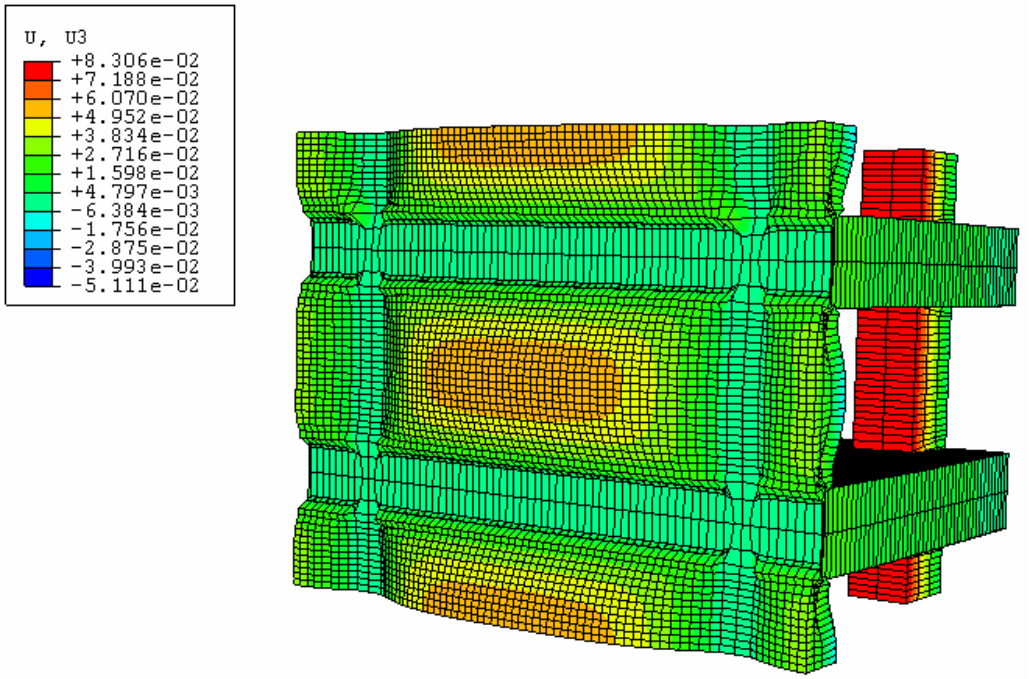


Fig. A3.8 – Deslocamentos máximos

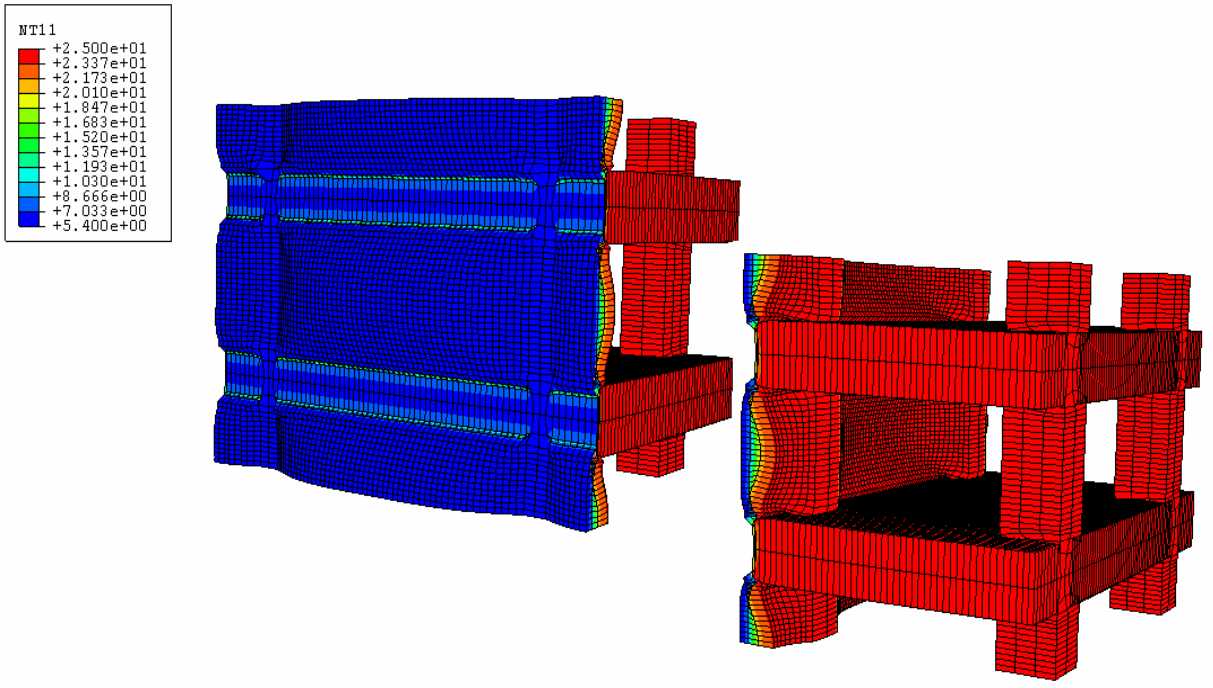


Fig. A3.9 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3.2.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC4

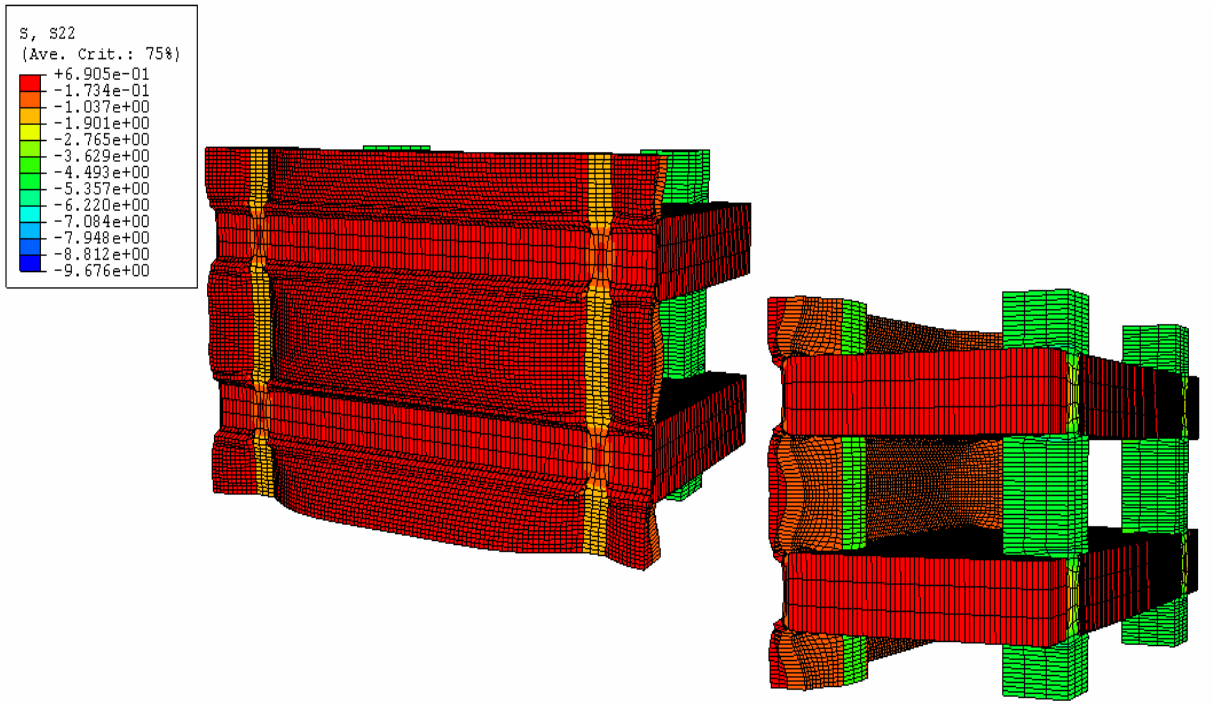


Fig. A3.10 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

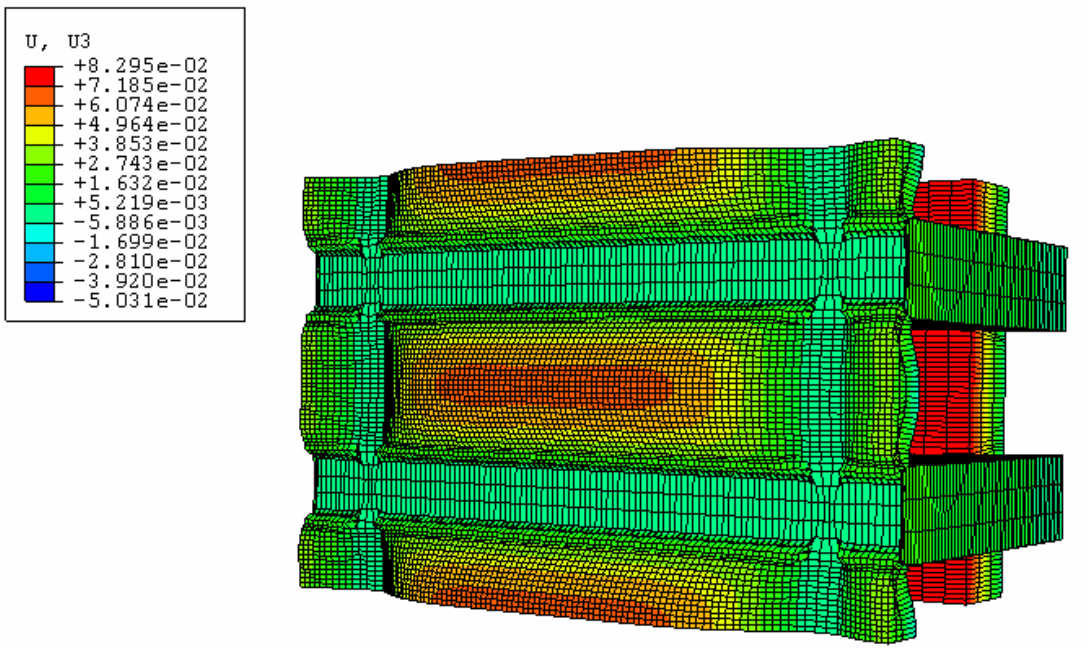


Fig. A3.11 – Deslocamentos máximos

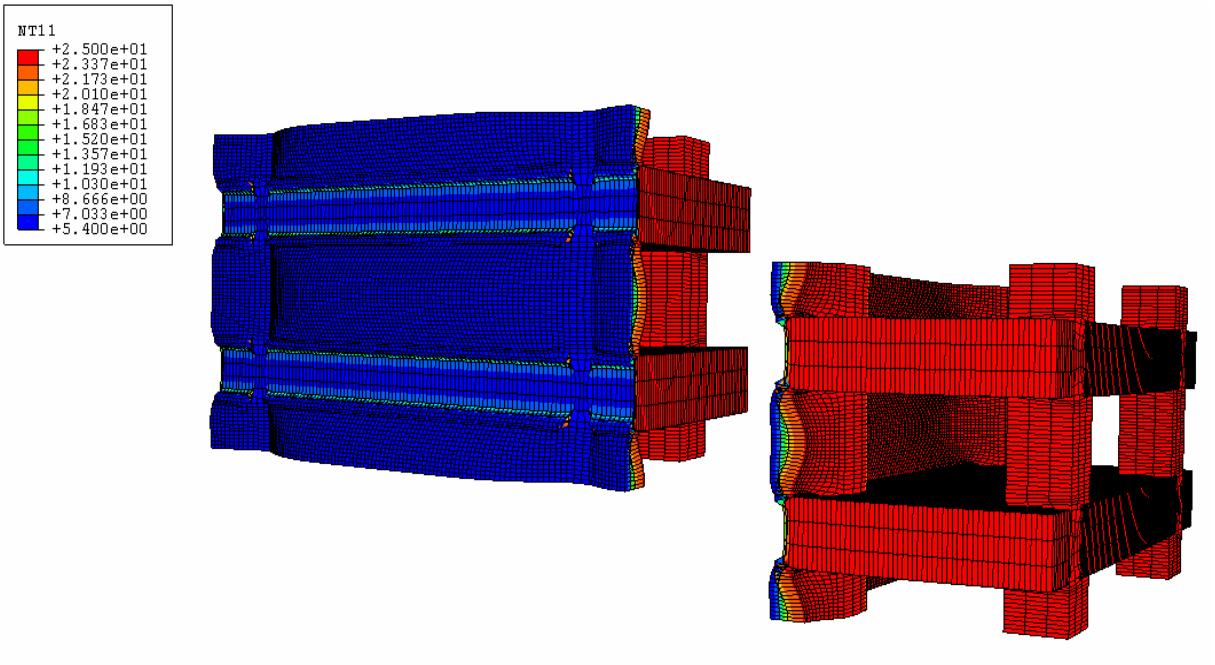


Fig. A3.12 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3.2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC5

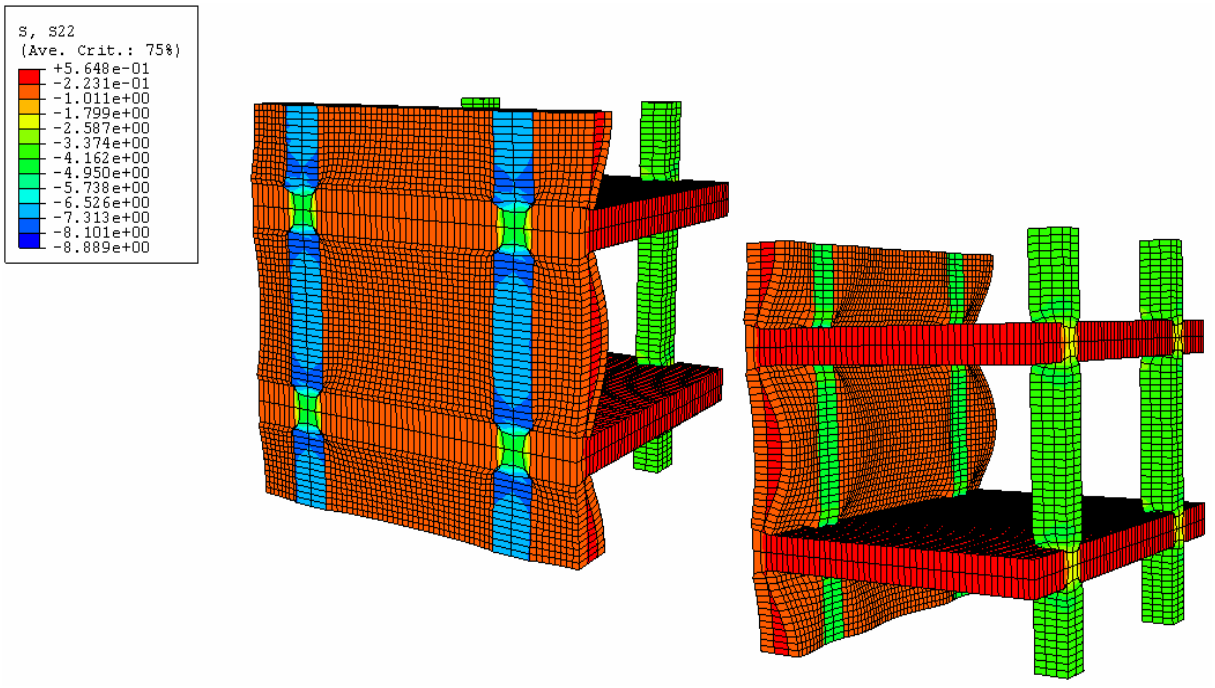


Fig. A3.13 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

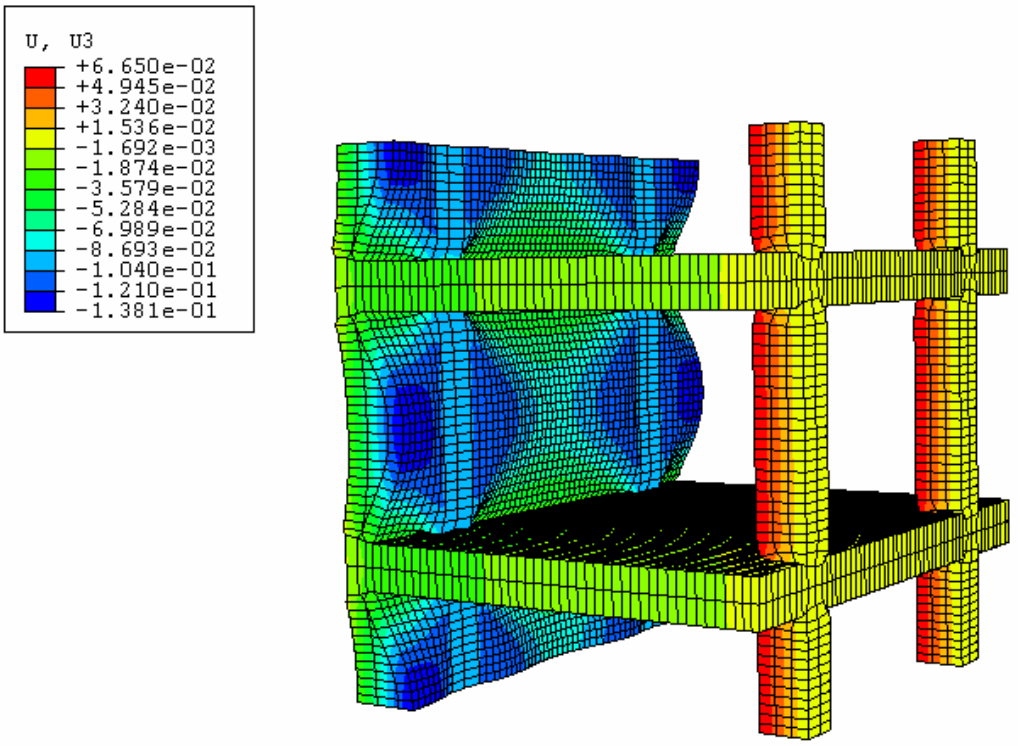


Fig. A3.14 – Deslocamentos máximos

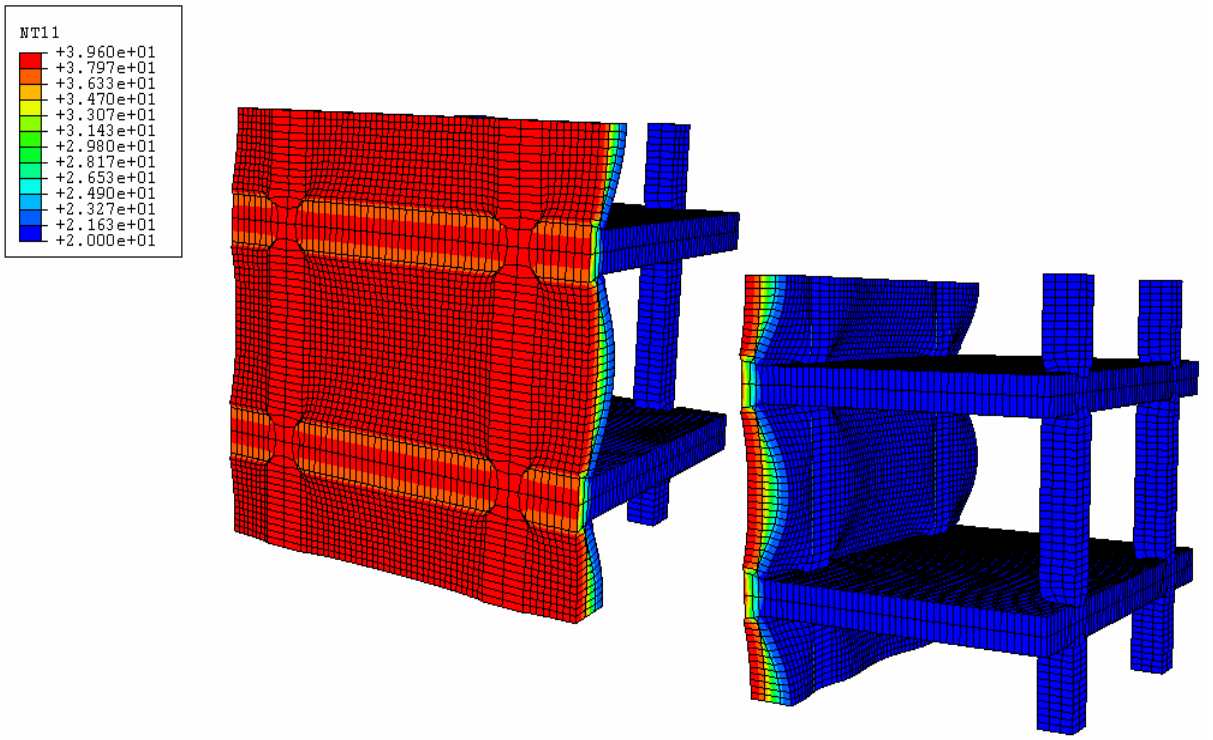


Fig. A3.15 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3.2.6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC8

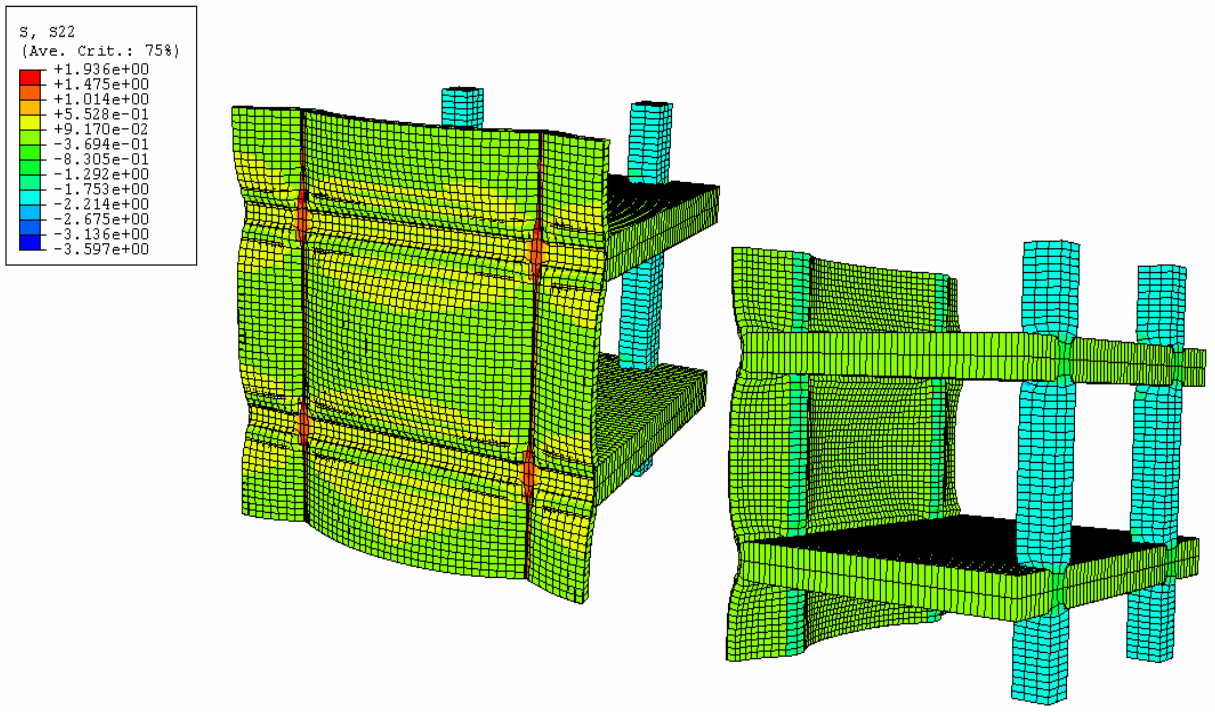


Fig. A3.16 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

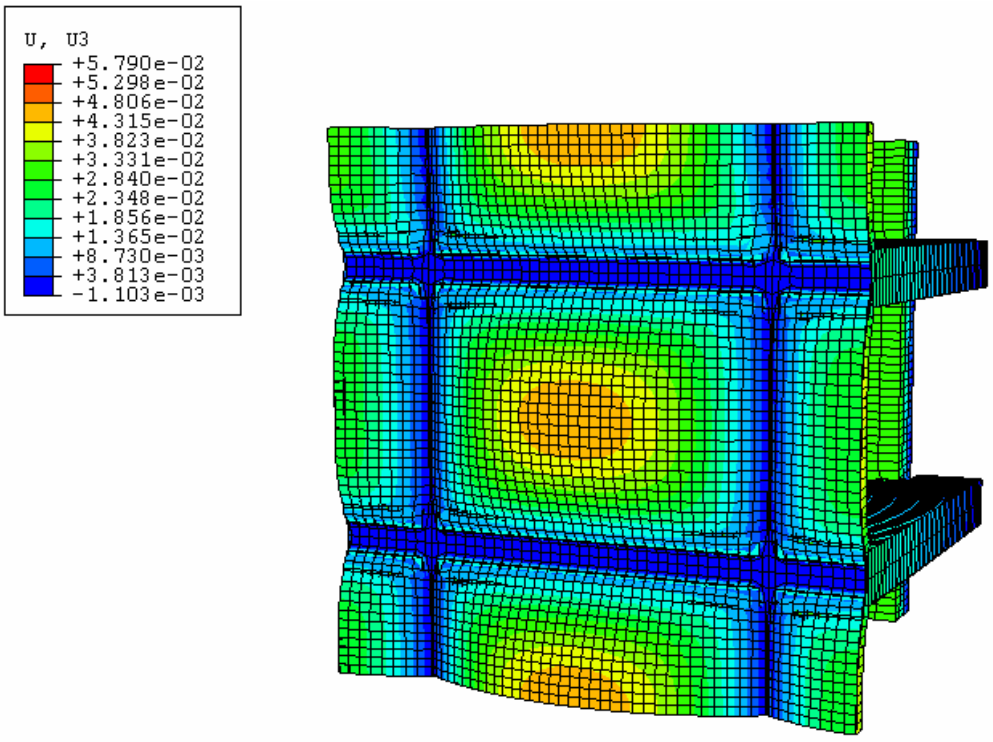


Fig. A3.17 – Deslocamentos máximos

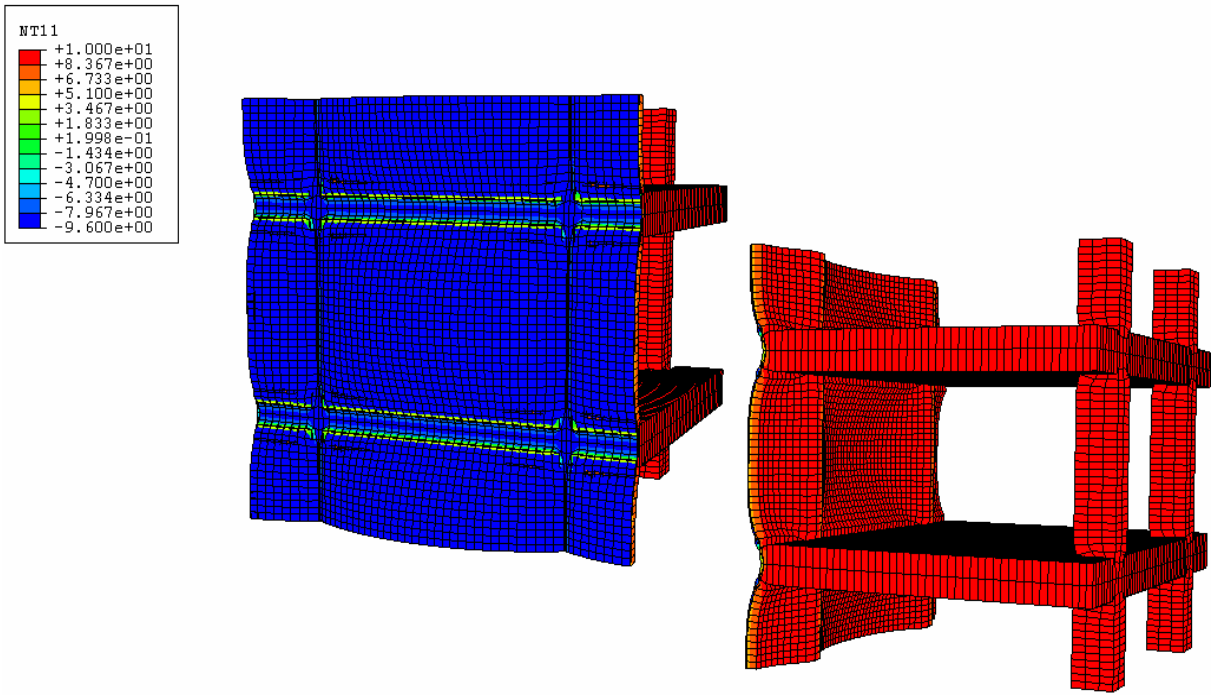


Fig. A3.18 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior

A3.2.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA SC9

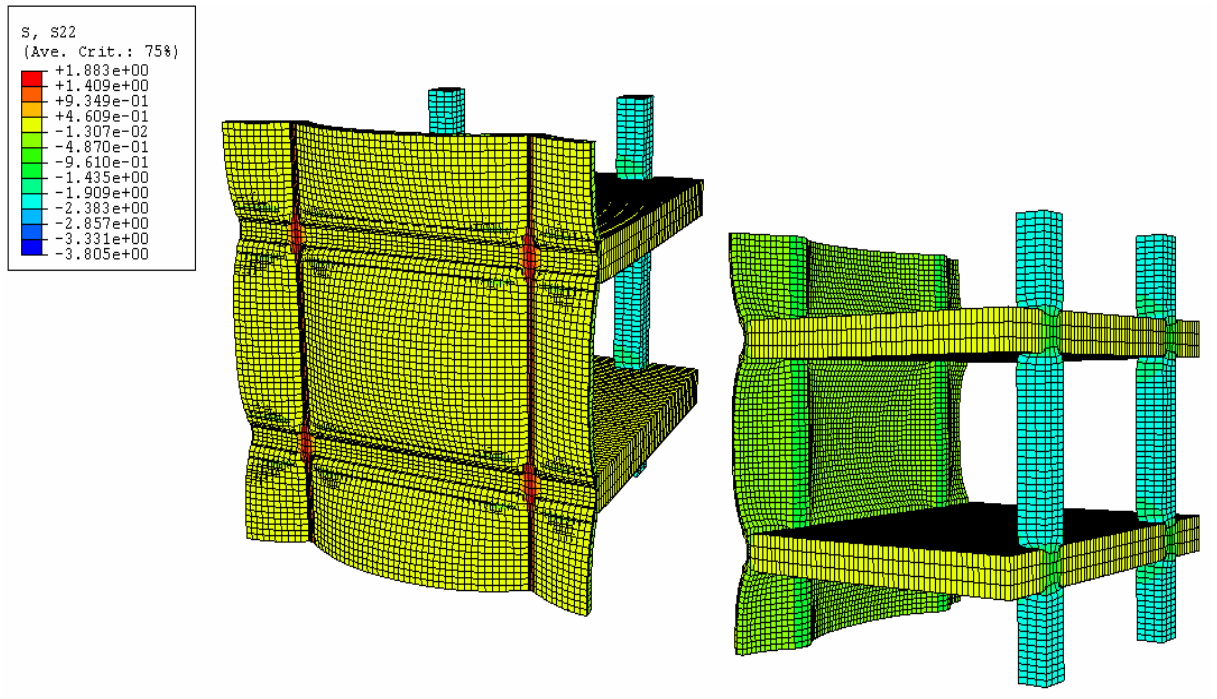


Fig. A3.19 – Distribuição de tensões nas faces exterior e interior

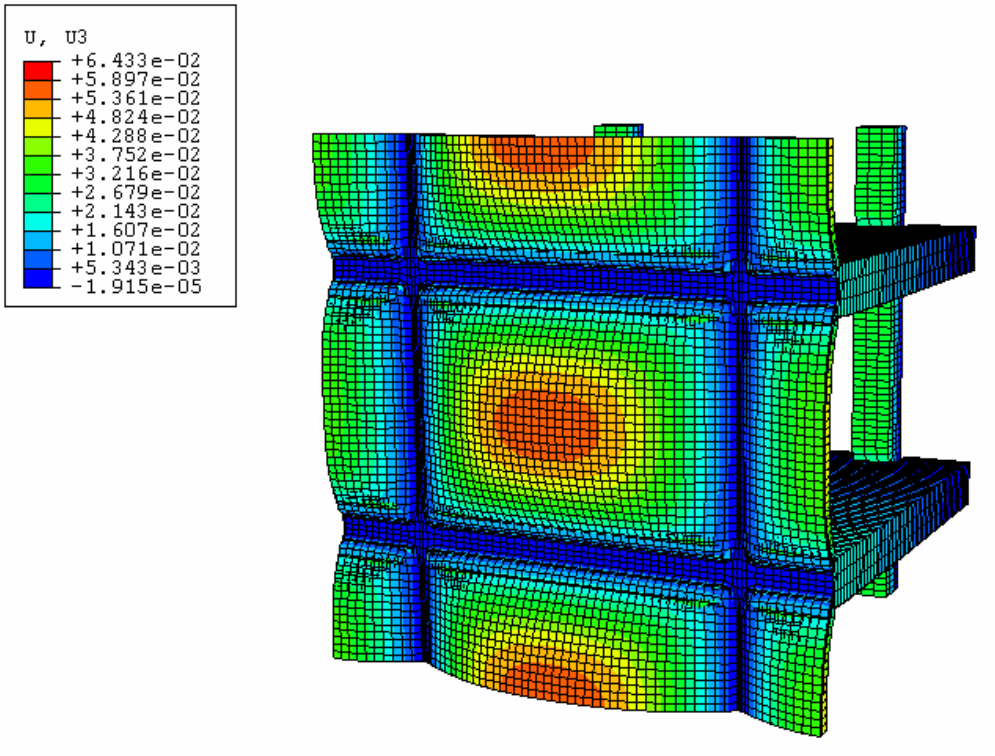


Fig. A3.20 – Deslocamentos máximos

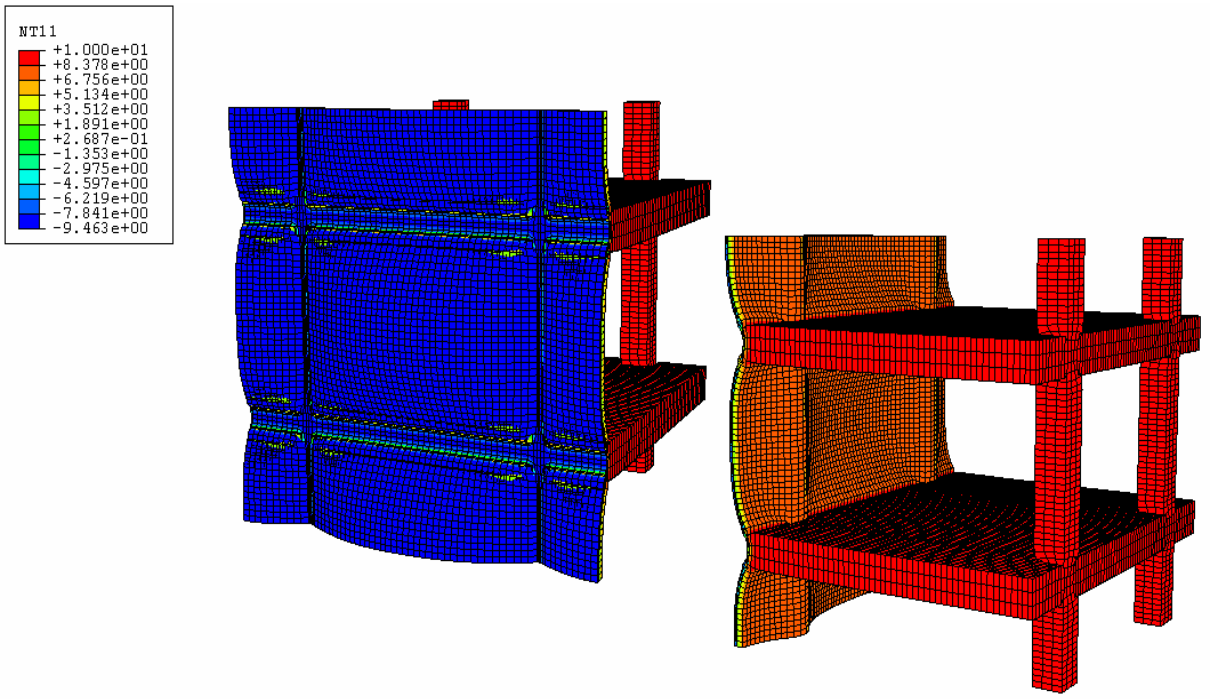


Fig. A3.21 – Distribuição de temperaturas nas faces exterior e interior