

# **Tratamento de Juntas em Painéis de GRC**

**José Luís Rodrigues Fernandes**

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Vítor Carlos Trindade Abrantes Almeida

JULHO 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](mailto: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](mailto: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.

A meus Pais

*Existe uma meta, mas não há caminho;  
o que chamamos caminho não passa de uma hesitação*  
*Franz Kafka*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho gostaria de mostrar a minha gratidão a todos aqueles que contribuíram para a sua realização.

Desejo, no entanto, destacar o Professor Vítor Abrantes pela sua orientação, leitura crítica do trabalho e pela confiança que sempre demonstrou no meu trabalho.

À Engenheira Ana Sofia Guimarães por estar sempre à disposição para discutir questões relevantes e o constante incentivo que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

À empresa Glasscrete, nomeadamente ao Engenheiro Rui Abrantes e Engenheiro Luís Loureiro, pela colaboração interessada e intensiva que sempre demonstraram e especialmente pelas sugestões sensatas que em muito contribuíram para o enriquecimento deste estudo.

À Professora Maria Helena Corvacho, pela disponibilidade e observações feitas na fase final do desenvolvimento do trabalho.

E por fim à minha família e amigos, muito especialmente aos meus pais, irmã e à Júlia pelo apoio e encorajamento.



## RESUMO

O recurso a sistemas de fachadas pré-fabricadas no ramo da Construção Civil tem-se demonstrado cada vez mais uma alternativa interessante e eficaz apresentando-se como uma solução de vanguarda no sentido de garantir ganhos ao nível da produtividade e qualidade. A introdução de painéis de GRC (*Glassfibre Reinforced Concrete*) no mercado da construção trouxe vantagens ao sector uma vez que concilia as vantagens da pré-fabricação com leveza, elevados níveis de desempenho e uma enorme flexibilidade de formas e acabamentos. Este compósito é constituído por uma matriz cimentícia reforçada com fibra de vidro resistente ao meio alcalino. A incorporação das fibras permite melhorar as propriedades mecânicas da argamassa, nomeadamente ao nível da resistência de tracção e flexão, fazendo com que os componentes possam ter espessuras menores e consequentemente menos peso em comparação com as peças de betão armado.

Ao nível do mercado são comercializados três tipos de painéis que são o tipo casca, sanduíche e *stud frame*. Possuem qualidades distintas e a sua escolha depende das exigências e características da obra.

No presente trabalho analisa-se a nível térmico a junta entre painéis sanduíche de GRC, verificando a sua conformidade com as exigências preconizadas no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) e propondo soluções de correcção.

O estudo teve como alvo as zonas de junta uma vez que se tratam de pontos críticos nas envolventes executadas com este tipo de painel. Tratando-se de heterogeneidades existentes ao longo da envolvente é necessário ter em conta que estamos perante regiões de ponte térmica que devem ser tidas em consideração e objecto de um estudo detalhado.

Com a implementação do novo RCCTE, as exigências mínimas a cumprir nas zonas de ponte térmica plana tornaram-se mais rigorosas impondo agora condições mais restritivas a ser respeitadas pelos projectistas e que podem por em causa a aplicação de painéis sanduíche sem tratamento das zonas de maior fragilidade térmica.

Deste modo a metodologia de trabalho partiu da identificação das zonas que apresentam maior debilidade, recorrendo ao cálculo dos parâmetros térmicos das zonas distintas que constituem o painel sanduíche de GRC. Através das análises e dos resultados obtidos verifica-se que é necessário fazer uma correcção das pontes térmicas planas. Desta forma desenvolve-se um modelo de cálculo que permita de forma fácil determinar o reforço necessário a integrar no sistema independentemente dos revestimentos aplicados na envolvente. Com este tipo de abordagem pretende-se obter um método que permita responder às necessidades da indústria do GRC, fornecendo um método de cálculo que se aplique aos diversos tipos de envolventes que podem ser executados recorrendo a painéis sanduíche. Esse método de cálculo é posteriormente desenvolvido para níveis de exigência superior, ultrapassando assim o limite inferior imposto pelo RCCTE. Serão analisados brevemente os detalhes construtivos relativos à solução preconizada recorrendo a desenhos de pormenor que facilitem a sua colocação em obra.

**PALAVRAS-CHAVE:** GRC, fachada, sanduíche, junta, RCCTE.



**ABSTRACT**

The use of prefabricated facade systems in Building Construction has been proved as an even more interesting and efficient alternative, showing to be a vanguard solution in order to guarantee profits at productivity and quality levels. The introduction of GRC (*Glassfibre Reinforced Concrete*) panels on the construction market brought advantages to the sector once that conciliates the prefabrication advantages with lightness, high performance levels and a great flexibility of shapes and finishing. This composite is composed by a cement matrix reinforced with alkaline medium proof glassfibre. The inclusion of fibres allows improving the mortar's mechanical properties, especially at the tensile and flexural strength resistance level, making the components to have less thickness and consequently less weight in comparison to the reinforced concrete pieces.

Regarding the building market there are three kinds of panels which are commercialized, these are the single skin type, the sandwich type and stud frame. They have distinct qualities and its choice depends of the exigencies and characteristics of the work.

In this work the joint between GRC sandwich panels is analysed at thermal level, verifying its conformity with the demands recognised at the Portuguese Code for Thermal Behaviour Characteristics of Buildings (*Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE*), and proposing correction solutions.

The study had as target the joint areas because these are critical points in the enclosures executed with this type of panel. Being related with heterogeneities existing throughout the enclosure, it is necessary to take into account that we are before regions of thermal bridge that must be taken into consideration and object of a detailed study.

With the implementation of the new *RCCTE*, the minimal exigencies to accomplish at the plain thermal bridge areas became more rigorous, imposing now more restrictive conditions to be respected by projectors and that may put in risk the application of sandwich panels without treatment of the areas of greater thermal fragility.

This way the work methodology has started from the identification of the areas that show major feebleness, taking advantage of the calculation of the thermal parameters of the distinct areas which constitute the GRC sandwich panel. Trough the analysis and the results obtained, it is verified that is necessary to do a correction of the plain thermal bridges. This way it is developed a calculation model which allows determining, in an easy way, the stiffener needed to integrate in the system, independently of the coatings applied in the enclosure. With this type of approach it is aspired to obtain a method that gives a solution to the needs of the GRC industry, providing a calculation method that can be applied in the various kinds of enclosures which can be executed using sandwich panels.

That calculation method is subsequently developed for superior exigency levels, exceeding this way, the inferior limit imposed by the *RCCTE*. It will be briefly analysed the constructive details related to the instituted solution using detail drawings that turns its placing easier at the work.

**KEYWORDS:** GRC, facade, sandwich, joint, *RCCTE*.



## ÍNDICE GERAL

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                    | i   |
| <b>RESUMO</b> .....                                            | iii |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                          | v   |
| <br>                                                           |     |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                      | 1   |
| 1.1 DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO EM ESTUDO .....                       | 1   |
| 1.2 INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO .....                   | 1   |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO .....                  | 2   |
| <br>                                                           |     |
| <b>2 BETÃO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO</b> .....              | 3   |
| 2.1 DESCRIÇÃO GERAL .....                                      | 3   |
| 2.2 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO .....                            | 3   |
| 2.3 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE GRC .....                         | 5   |
| 2.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO .....                          | 8   |
| 2.4.1 FIBRA DE VIDRO .....                                     | 8   |
| 2.4.2 MATRIZ DO COMPÓSITO .....                                | 10  |
| <br>                                                           |     |
| <b>3 PAINÉIS DE BETÃO REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO</b> ..... | 13  |
| 3.1 TIPOS DE PAINÉIS DE GRC .....                              | 13  |
| 3.2 PRODUÇÃO .....                                             | 15  |
| 3.2.1 EQUIPAMENTO .....                                        | 15  |
| 3.2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO .....                               | 16  |
| 3.2.2.1 Pré-mistura .....                                      | 16  |
| 3.2.2.2 Projecção directa .....                                | 18  |
| 3.3 CURA .....                                                 | 20  |
| 3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO GRC .....                        | 21  |

|            |                                                               |    |
|------------|---------------------------------------------------------------|----|
| <b>4</b>   | <b>JUNTAS DE FACHADAS PRÉ-FABRICADAS</b>                      | 25 |
| <b>4.1</b> | <b>GENERALIDADES</b>                                          | 25 |
| <b>4.2</b> | <b>TIPOS DE JUNTAS</b>                                        | 25 |
| <b>4.3</b> | <b>REQUISITOS DE DESEMPENHO EM JUNTAS SELADAS</b>             | 27 |
| <b>4.4</b> | <b>CONSTITUIÇÃO DA JUNTA SELADA</b>                           | 29 |
| <b>4.5</b> | <b>DIMENSIONAMENTO DE JUNTAS SELADAS</b>                      | 33 |
| <b>5</b>   | <b>PONTES TÉRMICAS</b>                                        | 37 |
| <b>5.1</b> | <b>DEFINIÇÃO</b>                                              | 37 |
| <b>5.2</b> | <b>TIPOS DE PONTES TÉRMICAS</b>                               | 39 |
| <b>5.3</b> | <b>CONSEQUÊNCIAS DA EXISTÊNCIA DE PONTES TÉRMICAS</b>         | 40 |
| 5.3.1      | INTRODUÇÃO                                                    | 40 |
| 5.3.2      | INCREMENTO DAS PERDAS TÉRMICAS                                | 40 |
| 5.3.3      | AGRAVAMENTO DO RISCO DE CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS             | 40 |
| 5.3.4      | POTENCIAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS E BOLORES          | 43 |
| 5.3.5      | HETEROGENEIDADE DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERIORES      | 44 |
| <b>5.4</b> | <b>REGULAMENTAÇÃO</b>                                         | 45 |
| 5.4.1      | COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA                            | 45 |
| 5.4.2      | COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR                     | 47 |
| 5.4.3      | REQUISITOS MINIMOS REGULAMENTARES                             | 48 |
| <b>6</b>   | <b>ESTUDO DO CASO</b>                                         | 53 |
| <b>6.1</b> | <b>IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA</b>                              | 53 |
| <b>6.2</b> | <b>CÁLCULO TÉRMICO SEM CORRECÇÃO DE PONTE TÉRMICA</b>         | 54 |
| <b>6.3</b> | <b>EQUACIONAMENTO DA SOLUÇÃO</b>                              | 58 |
| <b>6.4</b> | <b>DETALHES CONSTRUTIVOS</b>                                  | 62 |
| 6.4.1      | JUNTAS VERTICAIS                                              | 62 |
| 6.4.1.1    | Correcção da junta vertical em poliestireno expandido         | 62 |
| 6.4.1.2    | Correcção da junta vertical em poliuretano projectado         | 63 |
| 6.4.2      | JUNTAS HORIZONTAIS                                            | 65 |
| 6.4.2.1    | Correcção da junta horizontal em caso de ponte térmica linear | 66 |
| 6.4.2.2    | Correcção da junta horizontal em caso de ponte térmica plana  | 67 |
| 6.4.3      | PILAR DE CANTO                                                | 68 |

|            |                                        |    |
|------------|----------------------------------------|----|
| <b>6.5</b> | <b>VERIFICAÇÃO</b>                     | 69 |
| 6.5.1      | JUNTAS VERTICAIS                       | 69 |
| 6.5.2      | JUNTAS HORIZONTAIS                     | 74 |
| <b>6.6</b> | <b>COMPARAÇÃO SOLUÇÕES</b>             | 76 |
| <b>6.7</b> | <b>NÍVEIS DE QUALIDADE</b>             | 79 |
| 6.7.1      | NÍVEL MÉDIO                            | 79 |
| 6.7.2      | NÍVEL MÁXIMO                           | 80 |
| <b>7</b>   | <b>CONCLUSÕES</b>                      | 83 |
| <b>7.1</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>            | 83 |
| <b>7.2</b> | <b>PRINCIPAIS CONCLUSÕES</b>           | 84 |
| 7.2.1      | JUNTAS VERTICAIS                       | 84 |
| 7.2.2      | JUNTAS HORIZONTAIS                     | 84 |
| <b>7.3</b> | <b>PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO</b> | 85 |
|            | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                    | 87 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 2.1 - Resistência à tracção de fibras de vidro em solução aquosa de cimento Portland a 80 ° C [2]                                                                | 4  |
| Fig. 2.2 - Hotel San Francisco Marriot, Estados Unidos [8]                                                                                                            | 5  |
| Fig. 2.3 - Edifício com fachadas em GRC, Madrid                                                                                                                       | 6  |
| Fig. 2.4 - Edifício com fachadas em GRC, Maia                                                                                                                         | 6  |
| Fig. 2.5 - Torre de telecomunicações [6]                                                                                                                              | 7  |
| Fig. 2.6 - Contentor de lixo [9]                                                                                                                                      | 7  |
| Fig. 2.7 - Barreira acústica [10]                                                                                                                                     | 7  |
| Fig. 2.8 - Fibra de vidro pré-cortada ( <i>chopped</i> ) [11]                                                                                                         | 9  |
| Fig. 2.9 - Fibra de vidro em rolos ( <i>roving</i> ) [11]                                                                                                             | 9  |
| Fig. 2.10 - Fibra de vidro em manta ( <i>scrim</i> ) [11]                                                                                                             | 10 |
| Fig. 2.11 - Interação fibra/matriz em fase não fissurada submetida a esforços de tracção (esq.) e compressão (dir.) [12]                                              | 11 |
| Fig. 2.12 - Interação fibra/matriz em fase fissurada [12]                                                                                                             | 11 |
| Fig. 3.1 - Painel GRC tipo casca [7]                                                                                                                                  | 13 |
| Fig. 3.2 - Painel GRC sanduíche [7]                                                                                                                                   | 14 |
| Fig. 3.3 - Painel GRC strud frame [7]                                                                                                                                 | 14 |
| Fig. 3.4 - Misturadora [17]                                                                                                                                           | 15 |
| Fig. 3.5 - Pistola de projecção concêntrica [17]                                                                                                                      | 16 |
| Fig. 3.6 - Projecção directa com pistola concêntrica [adaptado 20]                                                                                                    | 18 |
| Fig. 3.7 - Metodologia de projecção [21]                                                                                                                              | 19 |
| Fig. 3.8 - Produção de painel de GRC por projecção directa                                                                                                            | 20 |
| Fig. 3.9 - Resistência à flexão na rotura de um provete de GRC sujeito a envelhecimento acelerado [adaptado 13]                                                       | 22 |
| Fig. 3.10 - Resistência à tracção na rotura de um provete de GRC sujeito a envelhecimento acelerado [adaptado 13]                                                     | 22 |
| Fig. 3.11 - Variação da resistência à flexão na rotura com a fracção de volume de fibra (GRC produzido por projecção com fibras de 37 mm) [adaptado 13]               | 23 |
| Fig. 3.12 - Variação da resistência à flexão na rotura com o comprimento das fibras (GRC produzido por projecção contendo 5% do peso em fibra de vidro) [adaptado 13] | 24 |
| Fig. 4.1 - Junta aberta [22]                                                                                                                                          | 25 |
| Fig. 4.2 - Junta selada [22]                                                                                                                                          | 26 |
| Fig. 4.3 - Movimento da junta em caso de expansão dos painéis                                                                                                         | 26 |
| Fig. 4.4 - Movimento da junta em caso de retracção dos painéis                                                                                                        | 27 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4.5 - Falha por adesão .....                                                                                       | 28 |
| Fig. 4.6 - Falha por coesão .....                                                                                       | 28 |
| Fig. 4.7 - Constituintes de juntas seladas [22] .....                                                                   | 29 |
| Fig. 4.8 - Limitador de junta [26] .....                                                                                | 30 |
| Fig. 4.9 - Colocação do limitador de junta .....                                                                        | 30 |
| Fig. 4.10 - Classificação dos selantes com base na ISO 11600 [27] .....                                                 | 32 |
| Fig. 4.11 - Dimensões típicas de junta entre painéis .....                                                              | 33 |
| Fig. 4.12 - Dimensões típicas de junta entre painéis de canto .....                                                     | 33 |
| Fig. 5.1 - Exemplos de ponte térmica [31] .....                                                                         | 38 |
| Fig. 5.2 - Fotografia e respectivo termograma de um edifício pré-fabricado [32] .....                                   | 38 |
| Fig. 5.3 - Trocas de calor entre dois ambientes .....                                                                   | 41 |
| Fig. 5.4 - Trocas de calor no painel sanduíche de GRC .....                                                             | 43 |
| Fig. 5.5 - Termograma e fotografia de uma zona de ponte térmica [34] .....                                              | 44 |
| Fig. 5.6 - Divisão de Portugal continental em função das zonas climáticas de Inverno [35] .....                         | 48 |
| Fig. 5.7 - Requisitos mínimos nas zonas de ponte térmica plana [36] .....                                               | 49 |
| Fig. 6.1 - Alçado da fachada .....                                                                                      | 54 |
| Fig. 6.2 - Detalhe da junta .....                                                                                       | 56 |
| Fig. 6.3 - Corte da fachada em zona de junta vertical .....                                                             | 56 |
| Fig. 6.4 - Painel sanduíche .....                                                                                       | 59 |
| Fig. 6.5 - Disposição construtiva – Correção da junta vertical em poliestireno expandido .....                          | 62 |
| Fig. 6.6 - Disposição Construtiva – Correção da junta vertical em poliuretano projectado .....                          | 64 |
| Fig. 6.7 - Junta horizontal no plano da laje – Ponte térmica linear .....                                               | 65 |
| Fig. 6.8 - Junta horizontal no plano da parede – Ponte térmica plana .....                                              | 65 |
| Fig. 6.9 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica linear resultante da junta horizontal ..                  | 66 |
| Fig. 6.10 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica plana resultante da junta horizontal<br>em EPS .....     | 67 |
| Fig. 6.11 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica plana resultante da junta horizontal<br>em PUR .....     | 68 |
| Fig. 6.12 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica nos pilares de canto .....                               | 69 |
| Fig. 6.13 - Disposição construtiva – Correção da junta vertical em poliestireno expandido .....                         | 70 |
| Fig. 6.14 - Disposição construtiva – Correção da junta vertical em poliuretano projectado .....                         | 72 |
| Fig. 6.15 - Disposição construtiva – Correção da junta horizontal ao nível da laje em poliuretano<br>projectado .....   | 74 |
| Fig. 6.16 - Disposição construtiva – Correção da junta horizontal ao nível da parede em poliestireno<br>expandido ..... | 75 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 6.17 - Disposição construtiva – Correção da junta horizontal ao nível da parede em poliuretano projectado ..... | 76 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1 - Composição química da fibra de vidro AR (expresso em percentagem de massa) [2].....                                                | 8  |
| Quadro 2.2 - Propriedades das fibras de vidro AR [2] .....                                                                                      | 9  |
| Quadro 2.3 - Propriedades da pasta de cimento Portland [2] .....                                                                                | 10 |
| Quadro 2.4 - Composição química da areia [13].....                                                                                              | 12 |
| Quadro 3.1 - Mistura proposta – Processo de pré-mistura [4;20] .....                                                                            | 17 |
| Quadro 3.2 - Mistura proposta – Processo de projecção directa [4;20] .....                                                                      | 19 |
| Quadro 3.3 - Propriedades mecânicas características de Cem-FIL GRC aos 28 dias [4;13] .....                                                     | 21 |
| Quadro 4.1 - Classificação dos selantes elastoméricos segundo ASTM C 920 [23].....                                                              | 31 |
| Quadro 4.2 - Dimensões padrão para juntas entre painéis de GRC .....                                                                            | 35 |
| Quadro 5.1 - Resistências térmicas superficiais [35] .....                                                                                      | 46 |
| Quadro 5.2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos [ $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$ ] [35]..... | 48 |
| Quadro 5.3 - Coeficientes de transmissão térmica de referência em $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$ [35] .....                                        | 49 |
| Quadro 6.1 - Quadro comparativo dos coeficientes de transmissão térmica [ $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$ ] .....                                   | 77 |
| Quadro 6.2 - Quadro comparativo das temperaturas superficiais interiores [ $^\circ C$ ].....                                                    | 78 |
| Quadro 6.3 - Propriedades específicas, para 5 cm, de materiais de isolamento [42;43] .....                                                      | 78 |



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$J$  – largura mínima da junta [mm]

$X$  – capacidade elástica de movimentação do selante em percentagem [%]

$A$  – movimentação calculada do painel para as variações térmicas [mm]

$B$  – tolerâncias de construção do material [mm]

$C$  – considerações sísmicas ou outras que se considerem apropriadas [mm]

$c$  – coeficiente dilatação térmico [mm/mm/°C]

$\Delta t$  – variação térmica [°C]

$l$  – comprimento do painel [mm]

$q$  – fluxo de calor [W/ m<sup>2</sup>]

$U$  – coeficiente de transmissão térmica do elemento [W/(m<sup>2</sup>°C)]

$t_i$  – temperatura do ambiente interior [°C]

$t_e$  – temperatura do ambiente exterior [°C]

$\theta_{si}$  – temperatura superficial interior [°C]

$h_i$  – condutância térmica superficial interior [W/(m<sup>2</sup>°C)]

$R_{si}$  – resistência térmica superficial interior [(m<sup>2</sup>. °C)/W]

$R_j$  – resistência térmica da camada  $j$  [(m<sup>2</sup>. °C)/W]

$R_{se}$  – resistência térmica superficial exterior [(m<sup>2</sup>. °C)/W]

$R_j$  – resistência térmica da camada  $j$  [(m<sup>2</sup>. °C)/W]

$d_j$  – espessura da camada  $j$  [m]

$\lambda_j$  – condutibilidade térmica do material da camada  $j$  [W/(m.°C)]

$L_{pt}$  – perdas de calor por diferença de temperatura [W/°C]

$\psi_j$  – coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica  $j$  [W/(m.°C)]

$B_j$  – desenvolvimento linear da ponte térmica  $j$  medido pelo interior [m]

$Q_t$  – perdas de calor por condução através da envolvente [W]

$Q_{ext}$  – perdas de calor pelos elementos em contacto com o exterior [W]

$Q_{lna}$  – perdas de calor pelos elementos em contacto com locais não aquecidos [W]

$Q_{pe}$  – perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo [W]

- $Q_{pt}$  – perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício [W]
- $GD$  – número de graus-dias de aquecimento
- $R_1$  – resistência térmica em zona corrente [ $m^2C/W$ ]
- $R_{se}$  – resistência térmica superficial exterior [ $m^2C/W$ ]
- $e_{GRC}^{ext}$  – espessura da camada exterior de GRC [m]
- $\lambda_{GRC}$  – condutibilidade térmica do material GRC [ $W/(m.^{\circ}C)$ ]
- $e_{iso}$  – espessura do isolamento térmico [m]
- $\lambda_{iso}$  – condutibilidade térmica do isolante térmico [ $W/(m.^{\circ}C)$ ]
- $e_{GRC}^{int}$  – espessura da camada interior de GRC [m]
- $R_{si}$  – resistência térmica superficial interior [ $m^2C/W$ ]
- $R_2$  – resistência térmica em zona maciça [ $m^2C/W$ ]
- $e^{Pla}$  – espessura total do painel de GRC [m]
- $R_3$  – resistência térmica em zona de junta [ $m^2C/W$ ]
- $R_2^C$  – resistência térmica em zona maciça após correcção da ponte térmica [ $m^2C/W$ ]
- $d$  – espessura do reforço [m]
- $\lambda_d$  – condutibilidade térmica do material usado para reforço [ $W/(m.^{\circ}C)$ ]

GRC – Glassfibre Reinforced Concrete

GRCA – Glassfibre Reinforced Concrete Association

PCI – Precast Concrete Institute

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

BRE – Building Research Establishment

MOR – Resistência à flexão na rotura

LOP – Limite elástico de flexão

UTS – Resistência de tracção na rotura

BOP – Limite elástico à tracção

ASTM – American Society for Testing and Materials

ISO – International Organization for Standardization

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ITE – Informações científicas e Técnicas de Edifícios

EPS – Poliestireno expandido moldado

PUR – Espuma rígida de poliuretano



## 1

## INTRODUÇÃO

**1.1 DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO EM ESTUDO**

O presente trabalho tem por objectivo estudar o comportamento térmico de juntas entre painéis de matriz cimentícia reforçada com fibras de vidro resistente aos álcalis do cimento, cuja denominação internacional é GRC (*Glassfibre Reinforced Concrete*). O estudo apenas recai na análise do comportamento de painéis do tipo sanduíche, isto é, constituídos exteriormente por GRC e interiormente por material isolante. Este critério deve-se ao facto deste tipo de configuração estar associado intrinsecamente a pontes térmicas nas zonas de união dos painéis que podem trazer consequências negativas no comportamento dos edifícios.

**1.2 INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO**

O interesse por sistemas pré-fabricados tem aumentado na indústria da construção. Os motivos que impulsionaram esta tendência foram as vantagens inerentes a este tipo de produção que permitem alcançar objectivos impossíveis de cumprir com o método tradicional. Os benefícios principais deste tipo de sistema são a rapidez de execução em obra e a qualidade das peças produzidas. Este tipo de produção racionalizada foi transposto para a produção de fachadas, emergindo novos sistemas e tecnologias.

As fachadas em GRC são fruto deste desenvolvimento, apresentando-se como uma solução muito eficaz e com características muito peculiares que facilitaram a sua “rápida” integração no mercado. Os dois principais centros de estudos a nível mundial de painéis de GRC são a Glassfiber Reinforced Concrete Association (GRCA) e o Precast Concrete Institute (PCI). Os seus trabalhos incidem principalmente no estudo e sistematização de directrizes de projecto a aplicar na execução de fachadas de GRC recorrendo a painéis do tipo *stud frame*. Isso deve-se à supremacia deste tipo de configuração no mercado mundial, especialmente ao nível do norte-americano. No âmbito nacional tal não ocorre, estando de certa forma limitado o recurso a este tipo de painéis devido ao preço elevado do aço que inviabiliza muitas vezes a sua utilização. Desta forma os estudos tendo como objecto os painéis sanduíche são claramente escassos e os existentes não se adaptam aos documentos normativos portugueses.

Um dos problemas inerentes à utilização dos painéis sanduíche é a especificidade existente nas zonas de junta, tratando-se de regiões de ponte térmica e exigindo assim um estudo detalhado. A implementação do novo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) trouxe exigências mais rigorosas nomeadamente ao nível de pontes térmicas podendo inviabilizar o recurso a este tipo de fachada sem a correcção apropriada das zonas termicamente mais frágeis. Na bibliografia consultada essa especificidade não é abordada, analisando o comportamento

térmico dos painéis como se tratassem de componentes homogéneos, não havendo assim interrupção do isolamento térmico ao longo do seu desenvolvimento.

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sensível à necessidade de abordar este problema, propôs o projecto de pesquisa intitulado “Tratamentos de Juntas em Painéis de GRC”, fruto da cooperação com a empresa Glasscrete.

Os principais objectivos deste trabalho podem sintetizar-se da seguinte forma:

- Verificação da conformidade das fachadas de edifícios executadas com painéis sanduíche de GRC com o RCCTE;
- Identificação das zonas de maior fragilidade ao longo da envolvente;
- Execução de um modelo de cálculo que permita determinar as características do reforço térmico a colocar nas zonas de ponte térmica;
- Abordar brevemente as disposições construtivas da solução preconizada.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO**

O trabalho está estruturado em sete capítulos.

No capítulo 1 define-se o domínio em estudo e apresenta-se os interesses e objectivos a atingir com a realização do presente trabalho.

No capítulo 2 realiza-se uma breve síntese do estado actual do conhecimento sobre betão reforçado com fibra de vidro. A análise incide principalmente no estudo dos constituintes que formam o compósito e em uma breve abordagem histórica da sua evolução. Por fim faz-se uma pesquisa do panorama actual de utilização de produtos de GRC.

O capítulo 3 apresenta os tipos de painéis GRC disponíveis no mercado e principais características. Posteriormente é mencionado as principais tecnologias utilizadas na sua produção e pormenoriza o procedimento de fabricação.

No capítulo 4 faz-se uma análise das juntas de união em painéis pré-fabricados, abordando as práticas de dimensionamento e materiais constituintes.

No capítulo 5 faz-se uma breve síntese do estado actual de conhecimento no domínio das pontes térmicas, analisando as consequências directas do fenómeno físico na envolvente e as patologias associadas. Na etapa seguinte é feita uma síntese dos parâmetros e requisitos mínimos expressos no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) que digam respeito às pontes térmicas.

No capítulo 6 verifica-se se existe incumprimento dos requisitos mínimos de qualidade térmica em fachadas constituídas por painéis sanduíche de GRC. Posteriormente é formulado o desenvolvimento de uma equação que permita o cálculo do reforço necessário nas zonas de ponte térmica, abordando as disposições construtivas da solução preconizada.

No capítulo 7 são sintetizadas as conclusões retiradas deste trabalho e propostos alguns temas para desenvolvimentos futuros.

## 2

## BETÃO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

### 2.1 DESCRIÇÃO GERAL

A sigla GRC (*Glassfibre reinforced concrete*), designada por GFRC nos Estados Unidos, é usada para intitular o produto manufacturado resultante da mistura cimento/agregado reforçada com fibras de vidro resistentes ao meio alcalino. As fibras conferem diferentes características à argamassa conseguindo obter do produto resultante propriedades mecânicas elevadas mediante um procedimento simples e de custo relativamente baixo [1].

O GRC pode resultar de vários tipos de combinações de materiais, dependendo estas proporções das características finais pretendidas. São inúmeros os factores que são variáveis no processo de manufacturação, composição da mistura, grau de compactação, tipo de cimento, proporções dos constituintes, comprimento e orientação das fibras e tipo de fabrico.

### 2.2 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

As primeiras aplicações de fibra de vidro como forma de reforço de um material ocorreram nos anos trinta nos Estados Unidos. Inicialmente o recurso a este tipo de mistura foi feito pela indústria de polímeros, tornando-se decisivo para o surgimento dos polímeros modernos [2].

Em 1950, após o sucesso obtido na produção de polímeros, são feitas as primeiras tentativas de utilizar este tipo de matéria no reforço do betão. O primeiro estudo feito ao composto resultante da adição de fibras de vidro ao cimento decorreu na Rússia, em 1964, por Byryukovich. A conclusão fundamental desta pesquisa foi que as fibras de vidro “E” (tipo de fibra de vidro usada na indústria dos plásticos, a denominação “E” deriva da propriedade de isolamento eléctrico em ambientes com baixa alcalinidade) não resistiam aos álcalis do meio, inviabilizando a sua utilização em matrizes fortes em hidróxidos de cálcio.

Com a consolidação da teoria dos materiais fibrosos, do desenvolvimento de técnicas de produção dos compósitos, do estudo de diferentes tipos de cimento e da análise das reacções químicas entre fibra/matriz, a década de 60 foi o ponto de partida para grandes avanços ao nível do GRC. Outro motivo que impulsionou o interesse por este tipo de material foi a descoberta dos efeitos maléficos para a saúde humana do amianto sendo desta forma necessário encontrar um substituto. Uma nova fibra de vidro foi desenvolvida na Inglaterra, como extensão das pesquisas feitas pelo BRE (Building Research Establishment), sendo designado de fibra de vidro AR (*alkali-resistant*). Este tipo de fibra foi conseguido através da adição de óxido de zircónio ao processo de fabrico [3].

Esta nova fibra de vidro apresentava um desempenho superior relativamente à do tipo E, devendo-se principalmente à maior compatibilidade existente entre os dois meios da mistura. A fibra de vidro do

tipo AR apresentava uma maior resistência ao ataque alcalino provocado pelo hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento e consequentemente melhores desempenhos ao nível de resistência e durabilidade dos componentes.

A Figura 2.1 representa o que foi afirmado anteriormente, mostrando graficamente o comportamento dos dois tipos de fibras imersas em solução aquosa de cimento Portland. A solução de cimento é aquecida a 80 °C para simular um envelhecimento acelerado do componente.

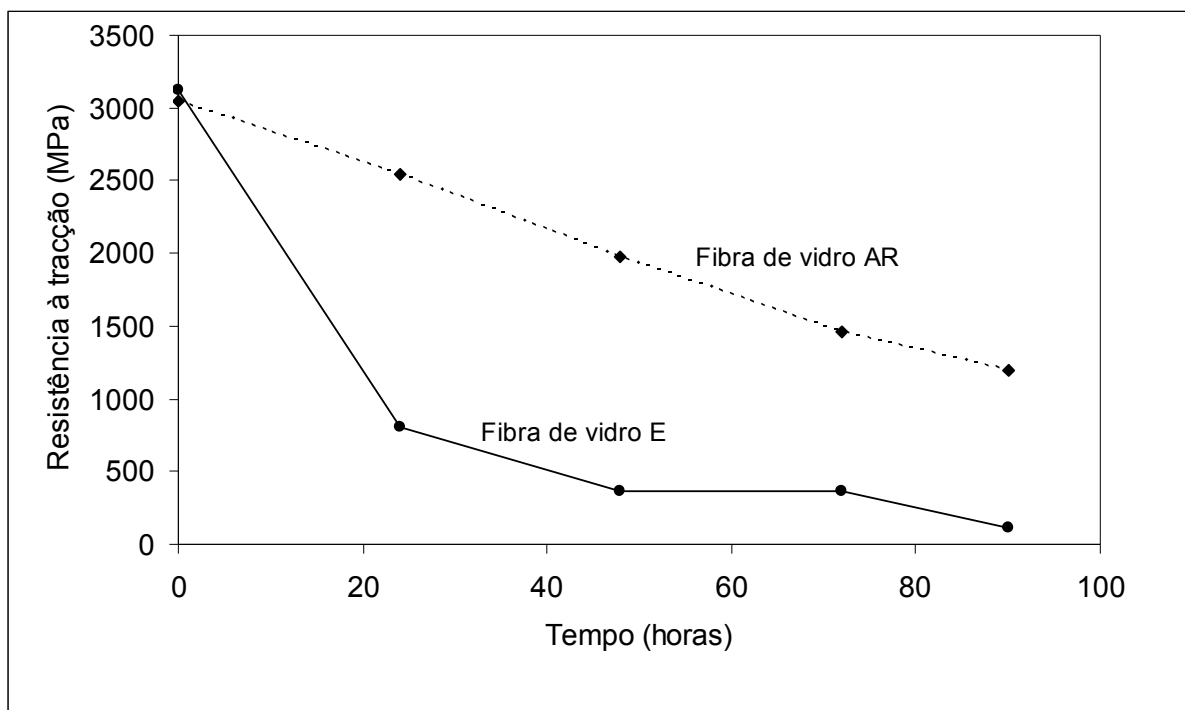


Fig. 2.1 - Resistência à tracção de fibras de vidro em solução aquosa de cimento Portland a 80 ° C [2]

Como se observa na figura anterior, a resistência à tracção em idades jovens é ligeiramente superior para a fibra de vidro do tipo “E”. Mas tal tendência é quase prontamente invertida, isto porque o decréscimo em termos de resistência é mais acentuado nas fibras de vidro “E”, de tal forma que para idades mais avançadas deixam de funcionar como elemento de reforço do sistema.

Em 1971 a empresa Pilkington Brothers consegue a patente da fibra de vidro AR, ficando designada a nível comercial de Cem-FIL AR. Estes avanços marcam o início da comercialização deste tipo de fibra, impulsionando o GRC como um novo material ao serviço da construção. Este tipo de material teve de imediato um impacto muito forte no sector da construção que levou à criação de uma associação em 1976 com o nome de GRCA (Glass Fibre Reinforced Cement Association) com sede em Camberley, Inglaterra [4]. Nos Estados Unidos o estudo deste composto está a cargo da PCI (Precast Concrete Institute), sendo seu objectivo principal desenvolver a tecnologia de painéis de fachadas em GRC [5].

No ano de 1980 a Pilkington Brothers lança uma nova versão da sua fibra Cem-FIL AR2 que se distinguiu da anterior pelo facto de possuir um revestimento que permite aumentar ainda mais a sua estabilidade a nível químico no seio da matriz de cimento.

### 2.3 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE GRC

São diversas as aplicações de GRC existentes no mercado tendo principal peso a produção de painéis de fachadas pré-fabricados, que representa cerca de 80% da produção a nível mundial [6]. O mercado da construção mostrou-se muito receptivo a este tipo de fachadas por potenciar a capacidade arquitectónica uma vez que permite uma grande versatilidade ao nível de geometria, dimensões, cores e textura. Por outro lado permite fabricar componentes de elevado desempenho mecânico e de baixo peso que se repercute na diminuição do peso próprio das estruturas que podem alcançar 1/6 do peso da peça equivalente em betão armado [7]. Os painéis podem ser utilizados na construção de edifícios novos, na restauração e na reabilitação de estruturas antigas ou danificadas.

Uma das obras de maior dimensão executada com painéis de fachadas em GRC foi o hotel San Francisco Marriot localizado nos Estados Unidos, ver Figura 2.2, totalizando 2400 painéis de fachada e com 42 andares.



Fig. 2.2 - Hotel San Francisco Marriot, Estados Unidos [8]

Como exemplo de mais um edifício executado com painéis de GRC pode ser referido o edifício executado pela empresa Glasscrete em Espanha na cidade de Madrid, ilustrado na Figura 2.3. Para a execução das fachadas do edifício recorreu-se a painéis do tipo *stud-frame* que totalizam uma área de aproximadamente 2000 m<sup>2</sup> distribuídos por 383 painéis.



Fig. 2.3 - Edifício com fachadas em GRC, Madrid

A nível nacional já existem vários edifícios executados com este tipo de fachada. Como exemplo é apresentado uma construção situada na Maia que conta com 168 painéis que perfazem uma área de 895 m<sup>2</sup>. A Figura 2.4 do lado esquerdo ilustra o edifício antes da colocação dos painéis de fachada e do lado direito representa a obra em fase de conclusão. De salientar neste exemplo que na fase de projecto houve o cuidado de recorrer a uma tipologia com planos ortogonais onde existe um elevado grau de regularidade e repetição na sua malha estrutural. Isso permite que haja uma sistematização de fabricação e de montagem dos painéis em obra que permitem uma redução do custo e aumento de produtividade.



Fig. 2.4 - Edifício com fachadas em GRC, Maia

Outras das aplicações usuais deste tipo de material são as barreiras acústicas utilizadas nas margens das vias rodoviárias, tubos de grande dimensão e diversas formas, revestimentos interiores, torres de comunicação, cabines telefônicas, reservatórios, etc. Este tipo de compósito também é usado na confecção de cofragens perdida de betão armado uma vez que é muito eficaz na resistência à carbonatação e na penetração de cloretos.



Fig. 2.5 - Torre de telecomunicações [6]



Fig. 2.6 - Contentor de lixo [9]



Fig. 2.7 - Barreira acústica [10]

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

### 2.4.1 FIBRA DE VIDRO

A fibra de vidro é obtida de alguns compostos químicos abundantes na natureza com os quais é fabricado o próprio vidro. A sua origem remonta à antiguidade mas a sua evolução ao nível da fabricação e de estudos científicos tiveram lugar no século XX.

São vários os tipos de fibra de vidro disponíveis no mercado, possuindo características distintas e aplicações específicas. Para responder às necessidades da indústria de construção civil foi necessário encontrar um tipo de fibra que possuísse características compatíveis com o cimento, uma vez que a maioria das obras recorrem a este tipo de aglomerante. Por outro lado, a fibra teria que possuir características mecânicas que permitissem o reforço da argamassa possibilitando desta forma obter um composto de maior resistência. Em resposta a esta necessidade apareceu ao nível de mercado a fibra de vidro do tipo AR para o reforço de argamassas. A característica principal deste tipo de fibra é a sua resistência aos álcalis do cimento que é obtida pela incorporação de um mínimo de 16% de óxido de zircónio ( $\text{ZrO}_2$ ) no seu processo de fabrico [1].

Quadro 2.1 - Composição química da fibra de vidro AR (expresso em percentagem de massa) [2]

| Composição              | Cem-FIL 2AR |
|-------------------------|-------------|
| $\text{SiO}_2$          | 62.0        |
| $\text{TiO}_2$          | 0.1         |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0.8         |
| $\text{ZrO}_2$          | 16.7        |
| $\text{CaO}$            | 5.6         |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 14.8        |

As propriedades principais que possuem este tipo de fibras são:

- Elevada resistência mecânica;
- Elevado módulo de elasticidade;
- Incombustibilidade;
- Estabilidade dimensional;
- Não são passíveis de inalação;
- Resistentes à corrosão;
- Retenção das características a altas temperaturas;
- Facilidade de processamento.

O quadro 2.2 apresenta algumas das propriedades deste tipo de fibra:

Quadro 2.2 - Propriedades das fibras de vidro AR [2]

| Características                                                      | Fibra de vidro AR |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Ponto de fusão (°C)                                                  | 1185              |
| Módulo de Young das fibras a 25°C (GPa)                              | 70                |
| Resistência à tracção de uma fibra a 25°C (MPa)                      | 3600              |
| Deformação na rotura (%)                                             | ≈ 2               |
| Resistência à tracção do feixe de fibras (MPa)                       | 1450 – 1900       |
| Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )                                       | 2.68              |
| Coefficiente de dilatação térmico linear (por 10 <sup>-6</sup> / °C) | 7.5               |
| Diâmetro do filamento (µm)                                           | 14 a 20           |

Ao nível de mercado existem várias formas de feixes de fibra de vidro que têm em conta as características e o método de produção desejado pelo cliente. Podem ser adquiridos na forma de pré-cortados (*chopped*), sendo este formato indicado para o método de produção designado por pré-mistura e variando o seu comprimento entre 3 mm e 25 mm. Outra forma é a comercialização em rolos (*roving*) sendo usado na produção por projecção, onde a fibra de vidro é cortada e projectada recorrendo a pistolas de projecção. Também existem fibras de vidro em mantas (*scrim*), menos utilizado que os mencionados anteriormente, usados para reforço de áreas que estão sujeitos a forças concentradas elevadas.



Fig. 2.8 - Fibra de vidro pré-cortada (*chopped*) [11]



Fig. 2.9 - Fibra de vidro em rolos (*roving*) [11]

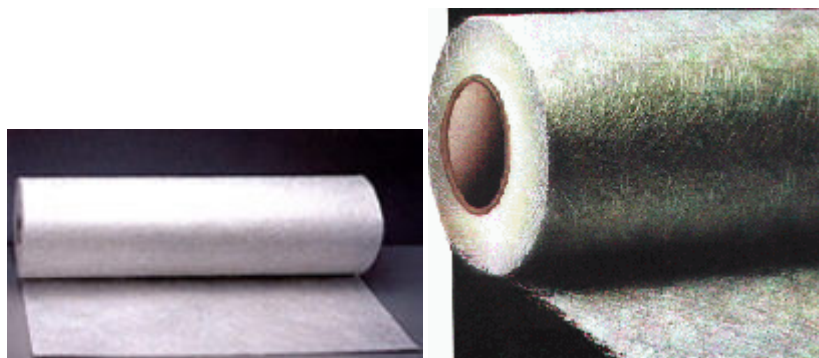


Fig. 2.10 - Fibra de vidro em manta (scrim) [11]

#### 2.4.2 MATRIZ DO COMPÓSITO

Na maioria das aplicações de GRC a proporção de fibras de vidro no composto é mínima, entre 1,5% a 5% do volume, sendo o volume restante constituído pela matriz de cimento. A matriz tem a função de envolver a fibra de vidro, proporcionando estabilidade e distribuindo os esforços actuantes para a fase de reforço (fibra de vidro). As propriedades da matriz são muito influenciadas pelas variáveis de fabrico. A constituição, o módulo de finura e a quantidade de água usada são importantes variáveis de controlo do grau de hidratação e consequente variação ao nível de resistência das peças. Uma razão alta de água/cimento resulta numa matriz muito porosa e muito frágil. Por outro lado, se a razão água/cimento é baixa, muito do cimento que contém a mistura não é eficazmente hidratado. Por estes motivos é necessário ter um intervalo restrito e devidamente controlado ao longo do processo de fabrico das peças de GRC.

O cimento Portland é actualmente o aglomerante mais usado na manufacturação de GRC, apresentando as seguintes características:

Quadro 2.3 - Propriedades da pasta de cimento Portland [2]

| Propriedades                                                         |             |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Módulo de Young (GPa)                                                | 7 – 28      |
| Resistência à compressão (MPa)                                       | 14 – 140    |
| Resistência à tracção (MPa)                                          | 1.4 – 7     |
| Deformação por tracção na rotura (%)                                 | 0,02 – 0.06 |
| Coefficiente de poisson                                              | 0,23 – 0,30 |
| Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )                                       | 1.7 – 2.2   |
| Coefficiente de dilatação térmica linear (por 10 <sup>-6</sup> / °C) | 5           |

Através da análise das propriedades apresentadas nos quadros 2.2 e 2.3 algumas conclusões podem ser retiradas, nomeadamente da forma como se dá a transferência de acções em caso de carregamento de um elemento em GRC.

Nas matrizes que não se encontram fissuradas, quando a acção é aplicada ao elemento, parte dela é transmitida às fibras e a restante à matriz de cimento. Devido à diferença de rigidez entre as duas

fases, a fibra de vidro tem um módulo de elasticidade muito superior a matriz do compósito, a deformação ao longo da fibra será menor materializando-se esta diferença em tensões de cisalhamento que se desenvolvem ao longo da superfície da fibra.

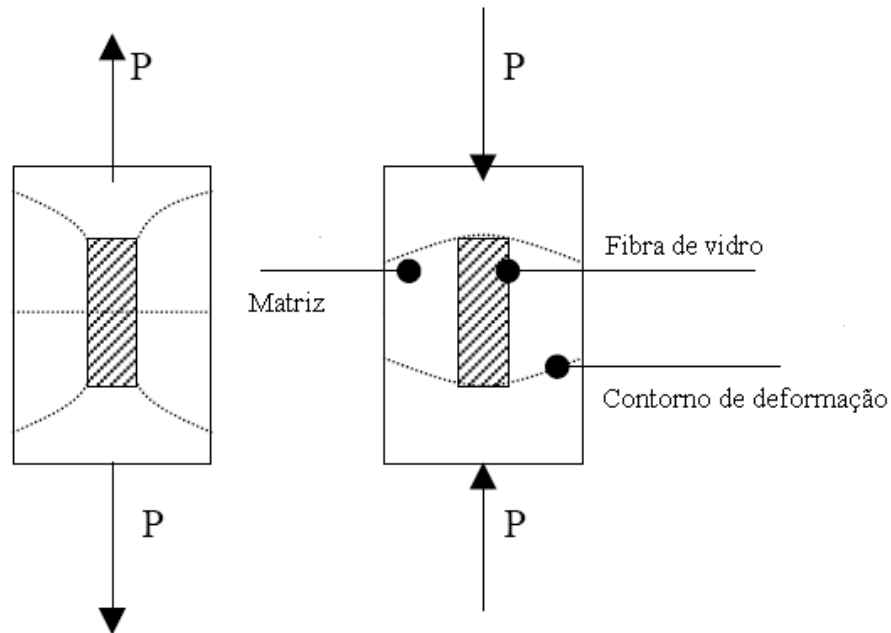


Fig. 2.11 - Interação fibra/matriz em fase não fissurada submetida a esforços de tração (esq.) e compressão (dir.) [12]

Nas matrizes fissuradas, as fibras actuam como obstáculo no alargamento das fendas, uma vez que quando carregado o elemento as fibras de vidro opõem-se ao seu alargamento concentrando a força em torno de si.

Estes dois fenómenos explicam a maior resistência à tração, flexão, impacto e tenacidade neste tipo de compósito.

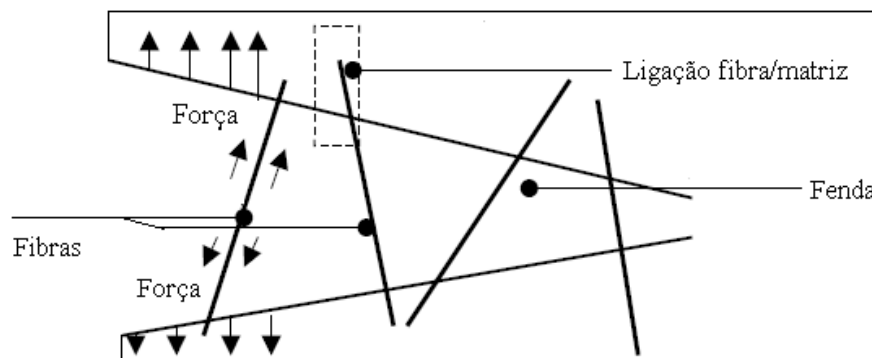


Fig. 2.12 - Interação fibra/matriz em fase fissurada [12]

Outro tipo de cimento que pode ser usado é o cimento branco, contém baixo teor de óxido de ferro, quando se pretende obter peças brancas ou com cores claras. Quando não existem limitações a nível arquitectónico este cimento dificilmente é usado uma vez que o seu preço é superior e exige maiores cuidados de manuseamento.

Sucessivas pesquisas em busca de cimentos compatíveis com o reforço em fibras de vidro têm sido feitas ao longo das três últimas décadas, procurando matrizes que contenham menor alcalinidade e que, preferencialmente, não formem hidróxido de cálcio durante a hidratação. Destes estudos concluiu-se que cimentos aluminosos e cimentos supersulfatados também podem ser usados em certos tipos de aplicações desde que o reforço seja feito com fibras de vidro AR. O objectivo deste estudo era substituir a fase de reforço por fibras do tipo E, uma vez que o seu preço de mercado é muito inferior comparativamente à fibra AR, mas concluiu-se que persistiam os problemas de alcalinidade impedindo assim a sua utilização.

Também existem recomendações para a areia adequada para a mistura. Em termos de composição aconselha-se o uso de uma areia siltosa uma vez que reduz a retracção na secagem, reduzindo desta forma a possibilidade de fissuração e flexão da peça. Ela deve ser lavada e preferencialmente seca de forma a reduzir a matéria solúvel e o teor em partículas finas, conseguindo desta forma um melhor controlo da razão água/cimento. A composição típica de uma areia aceitável para o uso na manufacturação de GRC aproxima-se dos seguintes parâmetros:

Quadro 2.4 - Composição química da areia [13]

| Composição       | %       |
|------------------|---------|
| Sílica           | 96 – 98 |
| Sal solúvel      | <1      |
| Perda ao fogo    | <0.5    |
| Matéria orgânica | <0.5    |

Frequentemente é adicionado adjuvante à mistura, redutores de água, aceleradores e retardadores de presa, e pigmentos de forma a colorir as peças de GRC.

## 3

## PAINÉIS DE BETÃO REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

### 3.1 TIPOS DE PAINÉIS DE GRC

A aplicação de GRC na produção de painéis foi pioneiramente utilizada na Inglaterra mas cedo se alastrou para o resto do mundo, tendo na actualidade uma produção anual próxima dos 10 biliões de  $m^2$ . Esta tecnologia tem como principais centros produtores a Espanha, Inglaterra, Estados Unidos, Canadá e Japão [14].

Ao nível de mercado existem três tipos de painéis de GRC: tipo casca, sanduíche e *stud frame* [15].

Os painéis tipo casca, ver figura 3.1, contêm uma camada de GRC onde são solidarizadas nervuras de reforço de forma a garantir a estabilidade estrutural do elemento construtivo. A necessidade de inserir nervuras de reforço aos painéis traz por vezes limitações ao nível de formas porque se torna complicado inserir nervuras em formas muito complexas. Outro dos pontos limitativos é em termos de dimensões máximas sendo normalmente painéis pequenos, a sua superfície máxima é aproximadamente  $7 m^2$  [16]. Em termos de peso apresentam grande leveza, oscilando entre  $30 Kg/m^2$  e  $45 Kg/m^2$ . Este tipo de painel é usado normalmente em placagens e cornijas.

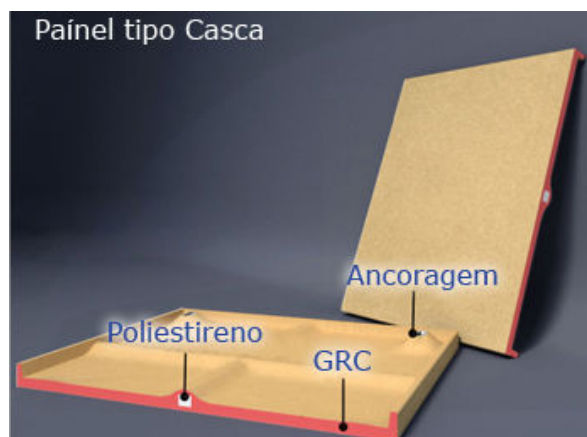


Fig. 3.1 - Painel GRC tipo casca [7]

Os painéis sanduíche são produzidos com duas camadas de GRC, contendo no seu interior material isolante. O tipo de painel mais usado é constituído por duas camadas de GRC de 10 mm e um núcleo de poliestireno expandido de 100 mm. Com este tipo de painel podem-se produzir peças em formas planas até  $12 m^2$  de superfície, sendo uma das dimensões máximas limitadas a 3,5 m devido às

limitações existentes no transporte das peças da fábrica para a obra a realizar. O seu peso varia entre 60 Kg/m<sup>2</sup> e 80 Kg/m<sup>2</sup> em função do tipo de acabamento superficial adoptado [16].

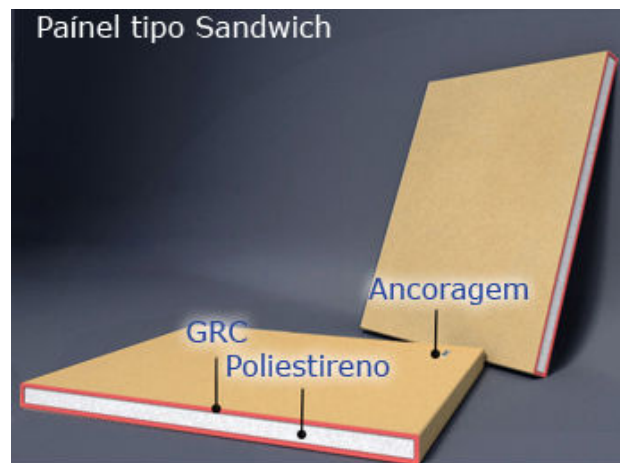


Fig. 3.2 - Painel GRC sanduiche [7]

Por fim o painel do tipo *stud frame*, ilustrado na figura 3.3, é constituído por uma camada de GRC e contém uma estrutura metálica que serve de reforço à estrutura. Foi uma inovação criada pela indústria americana no decorrer da década de 70 e permitiu aumentar o tamanho e a liberdade de geometria das peças [14]. A ligação destes painéis é feita entre a estrutura de reforço metálico e os elementos estruturais do edifício. O espaço que fica entre o paramento externo e interno da envolvente é muitas vezes aproveitado para a passagem de instalações e colocação de isolamento térmico e acústico permitindo desta forma ganhos em termos de área útil dos edifícios [1]. É possível construir peças até superfícies máximas de 22 m<sup>2</sup>, sendo muitas vezes as dimensões máximas dos painéis determinadas apenas pelas limitações legais de transporte. Em termos de peso as peças variam entre 45 Kg/m<sup>2</sup> e 65 Kg/m<sup>2</sup>.

Este tipo de painel é mais usado nos Estados Unidos, na Europa recorre-se menos ao *stud frame* uma vez que o custo do aço é superior inviabilizando muitas vezes a sua aplicação.

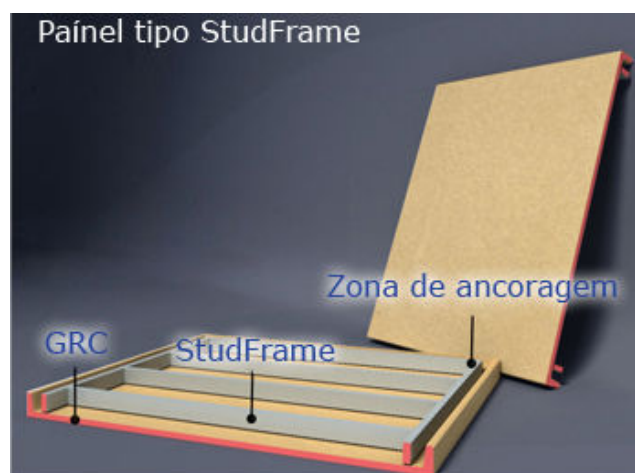


Fig. 3.3 - Painel GRC strud frame [7]

### 3.2 PRODUÇÃO

A maioria das tecnologias empregues na fabricação dos painéis de GRC derivam da indústria dos plásticos reforçados com fibras e da produção de resinas epoxídicas, uma vez que são os processos que permitem maior taxa de incorporação de fibras maximizando desta forma a resistência das peças produzidas. Obviamente que todo o processo de produção teve que sofrer adaptações que respondessem eficazmente às especificidades inerentes à indústria da construção e compatibilidades entre materiais utilizados.

Consoante os níveis de exigência e particularidades requerido pelo cliente, o arquitecto fornece as directrizes para a fase de projecto. A geometria e a modulação são estabelecidas através da interacção com o fabricante e, com base nessas informações, define-se o tipo de painel mais adequado para a construção. A fase seguinte passa pelo dimensionamento dos painéis tendo em conta as solicitações a que ficarão sujeitos ao longo da sua vida útil. Após o dimensionamento das juntas e execução dos detalhes de pormenor necessários para a execução da obra é que se passa à fase de produção dos painéis em fábrica.

Seguidamente será analisado os equipamentos utilizados para a produção de GRC e os vários métodos empregues na fabricação.

#### 3.2.1 EQUIPAMENTO

Os equipamentos usados no fabrico dos painéis são a misturadora e a pistola de projecção.

A figura 3.4 mostra um exemplo de misturadora usada na produção de GRC. A sua função é fazer a junção dos vários materiais constituintes da mistura. Existem vários tipos possuindo diversas velocidades de rotação e capacidades de volume.



Fig. 3.4 - Misturadora [17]

A pistola de projecção tem a particularidade de fazer o corte das fibras de vidro dentro de um tambor incorporado em tamanhos uniformes, que posteriormente serão projectadas juntamente com a

argamassa no molde por ar comprimido. A produtividade desta máquina está influenciada pela quantidade de argamassa a ser projectada e o diâmetro da pistola. A argamassa recebida já vem previamente preparada da misturadora.

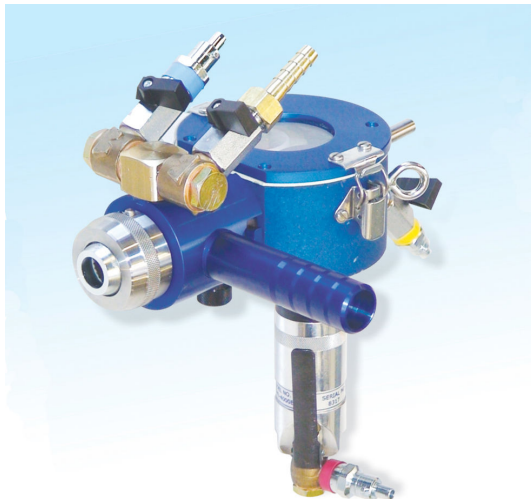


Fig. 3.5 - Pistola de projecção concêntrica [17]

### 3.2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO

De acordo com a geometria e o tipo, intensidade e eventuais direcções preferenciais das tensões a que o componente estará submetido nas etapas de manuseio, instalação e uso selecciona-se o método de produção mais adequado [18].

Para obter um produto que responda com qualidade às solicitações a que estará sujeito ao longo do seu tempo de vida é necessário controlar rigorosamente a composição da mistura e o processo de fabrico.

O processo de produção tem de permitir a incorporação e uma dispersão uniforme de uma quantidade suficiente de fibras, para alcançar um reforço adequado. Para que esse reforço seja adequado normalmente é preciso adicionar teores próximos de 5% em volume de fibra. Esse limite exige precauções ao nível da mistura cimento-areia, ou seja, a mistura deve conter uma pequena proporção relativa de areia de maneira a que permita a incorporação de um teor suficientemente elevado de fibra [19]. A combinação da dosagem e o tipo de método de produção, que determina a orientação das fibras, vai influenciar fortemente a resistência final do elemento.

Cinco tipos de processos de produção foram desenvolvidos para o GRC: pré-mistura (*premix*), projecção directa (*spray-up*), extrusão (*extrusion*), laminação por enrolamento (*winding*) e laminação (*lay-up*) [19]. Na fase seguinte apenas serão abordados os processos de pré-mistura e de projecção directa uma vez que são os mais utilizados na indústria do GRC.

#### 3.2.2.1 Pré-mistura

O método de fabricação por pré-mistura foi desenvolvido como uma tentativa natural de empregar na produção de componentes de GRC os mesmos equipamentos e técnicas utilizados para pré-fabricados

de betão comum. O método consiste na mistura inicial dos materiais que constituem a pasta de argamassa, adicionando posteriormente na misturadora a fibra de vidro AR pré-cortada.

As regras gerais para este tipo de produção são:

- A quantidade de água deve ser a mais baixa possível – normalmente adiciona-se plastificantes à mistura de forma a conseguir uma redução na quantidade de água usada sem por em causa a trabalhabilidade e conseguindo um aumento ao nível da resistência dos elementos produzidos;
- Usar uma quantidade adequada de fibra – esta quantidade deve ser aproximadamente entre 1,5% a 3% da massa total da matriz com o seu comprimento a variar entre 12-24 mm;
- A razão água/cimento deve ser preferencialmente inferior a 0.35 – na fase de produção deve-se ter cuidado com as quantidades de cimento de forma a evitar problemas de retracção.

No quadro 3.1 apresenta-se uma proposta da composição que deve ter a mistura no processo de produção por pré-mistura:

Quadro 3.1 - Mistura proposta – Processo de pré-mistura [4;20]

| Mistura proposta                      |                                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Cimento                               | 50 Kg                             |
| Areia                                 | 50 Kg                             |
| Água                                  | 15 – 17 Litros                    |
| Plastificante                         | Conforme indicações do fabricante |
| Polímero                              | Opcional                          |
| Cem-FIL AR cortada<br>(12 mm a 24 mm) | 1,5% – 3%                         |

Este método de produção tem várias dificuldades ao nível da mistura uma vez que se torna difícil obter uma dispersão uniforme das fibras ao longo da matriz, evitando a formação de fragmentos aglomerados de fibras que possam por em causa a resistência das peças. Este fenómeno é evitado com a verificação das proporções adequadas dos vários constituintes da mistura e respeitando os tempos de agitação recomendados para a produção por pré-mistura. Aumentar o tempo e a velocidade da mistura só vai aumentar o dano superficial das fibras e cortá-las em filamentos de menor comprimento diminuindo ainda mais a trabalhabilidade da mistura. Por vezes os fabricantes recorrem a relações de água/cimento superiores ao aconselhável na tentativa de contornar as dificuldades de mistura mas essa medida vai trazer repercussões negativas ao nível de exsudação e de resistência dos painéis de GRC.

Com este método de produção a distribuição das fibras é feita de forma tridimensional o que traz perdas ao nível de reforço efectivo das peças porque muitas delas não se distribuem espacialmente no plano de actuação das forças. Esse fenómeno ainda se agrava mais pela limitação ao nível da capacidade de incorporação de fibras na pré-mistura que é muito inferior ao de outras formas de produção.

Por estes motivos torna-se óbvio que este tipo de processo só seja usado para componentes em que as exigências de desempenho sejam menores, não exigindo elevada capacidade de resistência e direcções preferenciais de actuação de forças. No entanto este processo é normalmente escolhido para peças de difícil desmoldagem.

#### 3.2.2.2 Projecção directa

A projecção directa é o método de produção mais usado na indústria de GRC pela sua eficácia e facilidade de execução. Apenas será abordado o processo de execução que recorre à pistola de projecção concêntrica uma vez que é o mais usado na indústria de GRC.

O processo consiste na projecção do compósito directamente contra o molde através de equipamento dotado de duas unidades de projecção, uma para a injeção de argamassa e outra que corta e projecta as fibras de vidro (ver figura 3.6). Ao contrário do processo anterior, na projecção directa a fibra de vidro e a pasta de cimento são mantidas separadas e só entram em contacto na superfície do molde no momento da projecção.

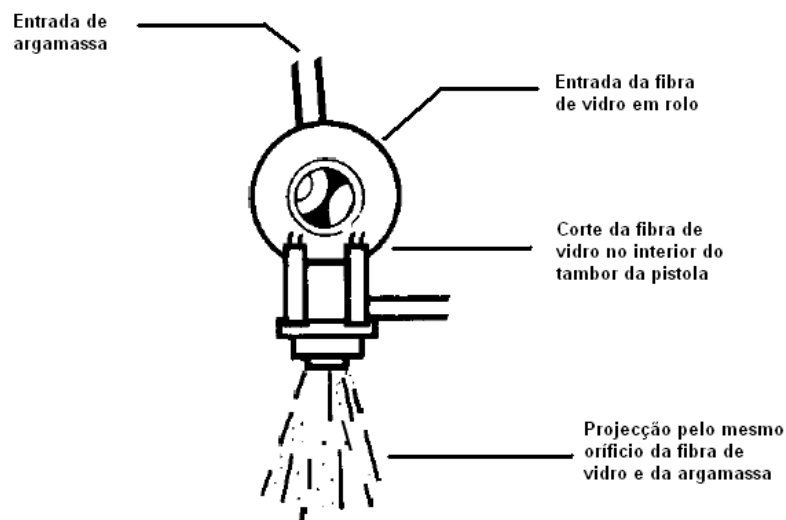


Fig. 3.6 - Projecção directa com pistola concêntrica [adaptado 20]

O teor de fibras incorporado na projecção directa é superior ao alcançado por pré-mistura, aproximadamente 5%, havendo uma distribuição bidimensional no plano projectado. A relação água/cimento é baixo, entre 0,30 a 0,35, exigindo o emprego de aditivos de forma a manter a consistência necessária para a sua projecção.

No quadro seguinte indica a composição sugerida para este tipo de produção:

Quadro 3.2 - Mistura proposta – Processo de projecção directa [4;20]

| Mistura proposta                      | Kg                                |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Cimento                               | 50 Kg                             |
| Areia                                 | 50 Kg                             |
| Água                                  | 15 – 17 Litros                    |
| Plastificante                         | Conforme indicações do fabricante |
| Polímero                              | Opcional                          |
| Cem-FIL AR cortada<br>(25 mm a 40 mm) | 3% – 5%                           |

Neste método manual, o operador move a pistola em faixas rectas ao longo do molde a preencher e direccionando o fluxo perpendicularmente [2]. O primeiro material a ser projectado no molde é uma camada de revestimento (*mist coat*), sem fibra de vidro, com cerca de 1 mm de espessura. A seguir projecta-se as várias camadas de GRC já com a fibra de vidro, e são recomendadas camadas com espessuras próxima de 3 mm e devidamente compactadas com rolos metálicos para evitar vazios no compósito. A camada inferior de GRC não deve endurecer antes da aplicação da próxima, para evitar a delaminação do componente. É também recomendado que cada camada deve ser projectada na direcção perpendicular à anterior, como demonstra a figura 3.7, conseguindo desta forma uma distribuição mais uniforme da pasta ao longo do molde [21].

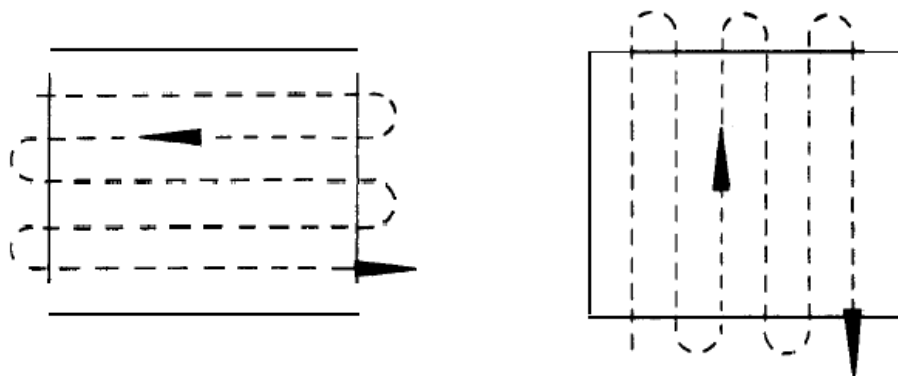


Fig. 3.7 - Metodologia de projecção [21]



Fig. 3.8 - Produção de painel de GRC por projecção directa

Neste método de produção por camadas consegue-se obter grande uniformidade e uma orientação das fibras no plano dos moldes, distribuição bidimensional, obtendo painéis de maior complexidade e de maior resistência.

### 3.3 CURA

O processo de cura exige cuidados para que não ocorra perdas ao nível da resistência mecânica final da peça. Os componentes de GRC são geralmente de baixa espessura e contêm quantidades baixas de água. É necessário garantir que a quantidade de água administrada à mistura seja suficiente para a hidratação total do cimento, sendo desta forma necessário evitar a rápida evaporação da água e retendo o máximo possível da mesma. Caso contrário vão ocorrer perdas na resistência esperada da peça.

No processo de produção de GRC usam-se dois tipos de cura: cura húmida e a cura ao ar.

A cura húmida consiste na protecção do painel com um filme de polietileno imediatamente a seguir à sua produção. Ele deve ficar coberto umas horas num ambiente que ronde os 16° C. Posteriormente pode ser removido do molde e curado por mais sete dias em câmara húmida, com temperatura variando entre 15-20° C e humidade relativa de 95%.

A cura ao ar apresenta-se como uma alternativa ao método anteriormente apresentado e consiste na incorporação de polímeros na mistura que impeçam a saída de água da matriz. O polímero forma uma película à volta do compósito possibilitando assim a retenção da humidade utilizada para a hidratação do cimento.

### 3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO GRC

As propriedades mecânicas das peças de GRC dependem da composição da mistura e do processo de produção usado na sua manufatura.

O quadro 3.3 ilustra o comportamento mecânico esperado do GRC aos 28 dias recorrendo aos dois processos de produção mencionados anteriormente:

Quadro 3.3 - Propriedades mecânicas características de Cem-FIL GRC aos 28 dias [4;13]

| Propriedades                           | Unidades         | Processo de produção |                        |
|----------------------------------------|------------------|----------------------|------------------------|
|                                        |                  | Projecção            | Pré-mistura e moldagem |
| Dosagem de fibra Cem-FIL               | Peso %           | < 5                  | < 3                    |
| Resistência à flexão na rotura (MOR)   | MPa              | 20 – 30              | 10 – 14                |
| Limite elástico de flexão (LOP)        | MPa              | 7 – 11               | 5 – 8                  |
| Resistência de tracção na rotura (UTS) | MPa              | 8 – 11               | 4 – 7                  |
| Limite elástico à tracção (BOP)        | MPa              | 5 – 7                | 4 - 6                  |
| Resistência ao corte interlaminar      | MPa              | 3 – 5                | N/A                    |
| Resistência ao corte no plano          | MPa              | 8 – 11               | 4 – 7                  |
| Resistência à compressão               | MPa              | 50 – 80              | 40 – 60                |
| Resistência ao Impacto                 | MPa              | 10 – 25              | 10 – 15                |
| Módulo de elasticidade                 | GPa              | 10 – 20              | 10 – 10                |
| Deformação na rotura                   | %                | 0.6 – 1.2            | 0.2 – 0.6              |
| Peso específico seco                   | t/m <sup>3</sup> | 1.9 – 2.1            | 1.9 – 2.0              |

Estes valores têm apenas carácter indicativo e servem como suporte para:

- Determinar parâmetros apropriados de projecto;
- Direcção para o tipo de solução mais adequada para fazer frente às solicitações esperadas;
- Monitorização da qualidade dos componentes produzidos.

Das várias propriedades apresentadas no quadro 3.3 umas dependem principalmente da qualidade da matriz enquanto que outras estão mais relacionadas com as características das fibras de vidro usadas. A resistência à compressão, módulo de elasticidade, limite elástico de flexão (LOP), limite elástico à tracção (BOP) e a resistência ao corte interlaminar dependem fortemente das características da matriz enquanto que a resistência ao impacto, resistência à flexão na rotura (MOR), resistência de tracção na rotura (UTS), deformação na rotura e a resistência ao corte no plano são principalmente influenciadas pela propriedade das fibras de vidro.

Estas características mecânicas sofrem alterações no tempo uma vez que o compósito GRC sofre degradações como ocorre com os restantes materiais que tem como elemento base o cimento. No entanto apresenta algumas vantagens em função da estabilidade química da fibra AR, da baixa porosidade da matriz, da baixa razão água/cimento, da adição de polímeros, do elevado consumo de cimento e da redução das fissuras de retracção proporcionados pelas fibras. Os ambientes mais penosos para o GRC são os quentes e húmidos pois o óxido de zircónio, que confere a durabilidade à fibra, reage nestas condições com maior intensidade com os álcalis do cimento.

Um estudo que permite ter uma noção do decréscimo das propriedades do GRC foi feito por Litherland *et al.* em 1981 [18]. O ensaio baseia-se na imersão de provetes em água a uma temperatura de 50 °C. Estas condições permitem obter um envelhecimento acelerado do GRC e relacionar posteriormente com os anos correspondentes à degradação causada pelo clima do Reino Unido (Fig.3.10 e Fig.3.11).

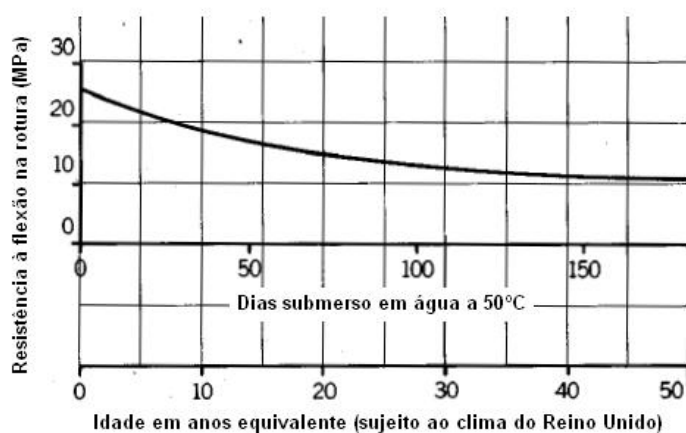


Fig. 3.9 - Resistência à flexão na rotura de um provete de GRC sujeito a envelhecimento acelerado [adaptado 13]

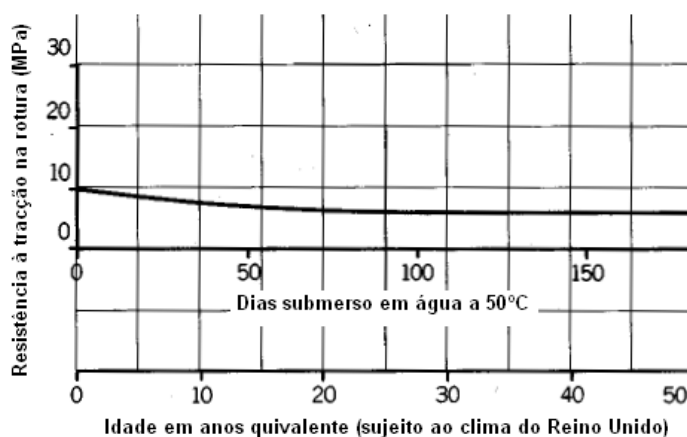


Fig. 3.10 - Resistência à tracção na rotura de um provete de GRC sujeito a envelhecimento acelerado [adaptado

13]

Como mostram os gráficos anteriormente apresentados nos primeiros 15 anos há um decréscimo acentuado das suas características de resistência mas que estabilizam a longo prazo. Esta propriedade é muito importante porque permite indicar valores de resistência recomendados para a fase de projecto. De qualquer forma convém ter em atenção que o decréscimo das propriedades é consideravelmente menor em climas secos (com humidades inferiores a 50%).

O método de produção escolhido para o fabrico das peças de GRC vai ser muito relevante na resistência das peças porque implica alterações ao nível de composição da mistura e de distribuição das fibras. As limitações da pré-mistura derivam da quantidade de fibra que se consegue incorporar na mistura sem causar dificuldades de fabrico, ronda entre 2% a 3% do volume, ao contrário da projecção que atinge valores mais elevados. Esta diferença traz alterações ao nível de desempenho mecânico uma vez que o aumento da fracção de fibra aumenta a resistência ao impacto, flexão e tracção.

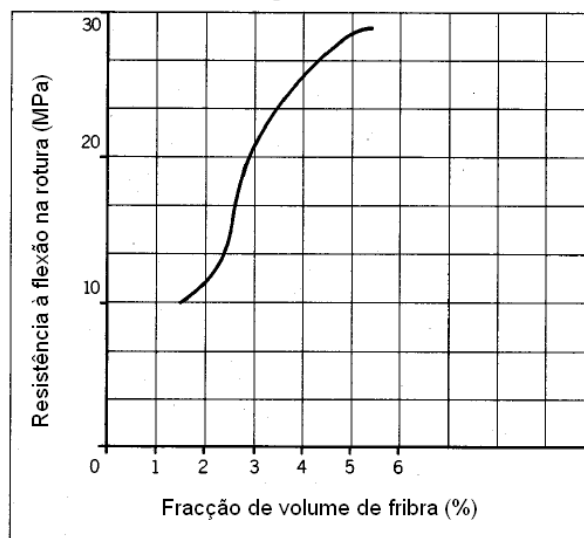


Fig. 3.11 - Variação da resistência à flexão na rotura com a fracção de volume de fibra (GRC produzido por projecção com fibras de 37 mm) [adaptado 13]

Outra diferença recai na diferença de comprimento das fibras usadas, uma vez que comprimentos maiores aumentam o reforço. Com o método de projecção o comprimento das fibras usadas é muito superior ao da pré-mistura.

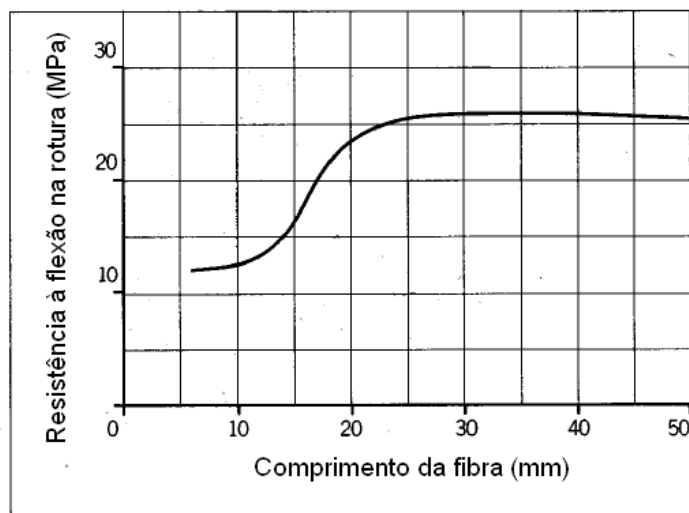


Fig. 3.12 - Variação da resistência à flexão na rotura com o comprimento das fibras (GRC produzido por projecção contendo 5% do peso em fibra de vidro) [adaptado 13]

Como se observa na figura 3.13, a variação do reforço com o comprimento não é linear. Para 4.1% de volume de fibra (5% em peso) o efeito da mudança de comprimento da fibra entre 25mm a 50mm é marginal para o desempenho mecânico do compósito, excepto na resistência ao impacto que aumenta com o comprimento. Abaixo do patamar dos 25 mm ocorre um decréscimo na resistência e com 12mm as resistências obtidas por projecção assemelham-se à alcançada pela pré-mistura.

## 4

## JUNTAS DE FACHADAS PRÉ-FABRICADAS

### 4.1 GENERALIDADES

As juntas nas fachadas pré-fabricadas exigem especial atenção no seu dimensionamento e na escolha do material de enchimento adequado. Elas costumam ser o ponto crítico das fachadas por estarem expostas às intempéries e submetidas a um grande número de solicitações.

Na escolha da junta mais adequada são vários os critérios que são tidos em conta: acomodação dos movimentos dos painéis, aspecto e requisitos arquitectónicos, função a que se destina o empreendimento, exposição (orientação e condições climáticas) e aspectos económicos. As decisões do projectista devem ter em conta os factores enumerados anteriormente e levarão à escolha das seguintes variáveis [1]:

- Tipo de junta a utilizar;
- Localização e número de juntas a executar em obra;
- Largura e profundidade da junta;
- Tratamento arquitectónico;
- Selecção dos materiais constituintes.

### 4.2 TIPOS DE JUNTAS

As fachadas pré-fabricadas podem ter juntas abertas ou seladas, conforme o tipo de painel usado e a função que desempenham.

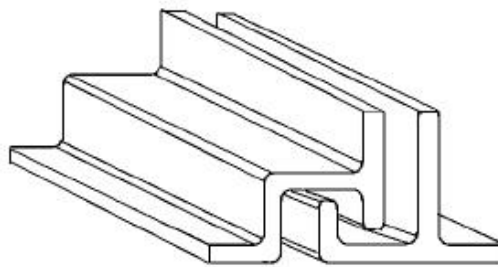


Fig. 4.1 - Junta aberta [22]

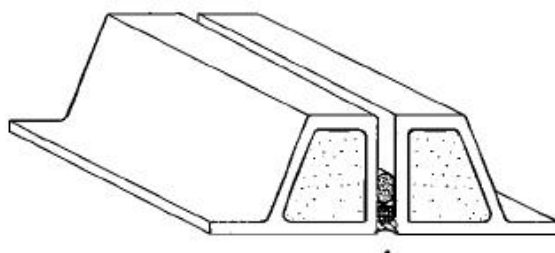


Fig. 4.2 - Junta selada [22]

Nas juntas abertas o volume existente entre a ligação dos dois elementos não é preenchida com qualquer tipo de material de enchimento. Este tipo de descontinuidade na fachada permite acomodar as variações dimensionais dos painéis devido às alterações de temperatura e de humidade e controlar as tolerâncias de fabricação e de montagem. Este tipo de junta é normalmente usado em fachadas onde não existam exigências a nível térmico e acústico, de resistência ao fogo e de estanqueidade, como por exemplo varandas.

Relativamente a juntas seladas, as suas funções são de garantir a estanqueidade, contribuir no isolamento térmico e acústico da fachada, acomodar as tolerâncias de fabrico e de montagem e permitir os movimentos cíclicos e frequentes a que os painéis estão sujeitos.

O princípio de funcionamento da junta selada é de criar na fachada uma região que permita absorver os esforços transmitidos pelos painéis que são dissipados através da deformação do selante. A junta pode ser solicitada por diferentes acções e o selante deve possuir capacidade de responder eficazmente às várias solicitações a que estará sujeito. Para um melhor entendimento do seu comportamento a seguir serão analisados os casos de expansão e retracção dos painéis devidos a diferenciais de temperaturas e a resposta dada pelas juntas e estes tipos de solicitações.

Quando o revestimento está sujeito a um aumento de temperatura a tendência natural dos painéis é aumentar de tamanho. O selante também tem tendência a expandir mas vai sujeitar-se ao movimento contrário e permitir o fechamento da junta compensando desta forma as variações dimensionais do sistema, como ilustra a Figura 4.3.

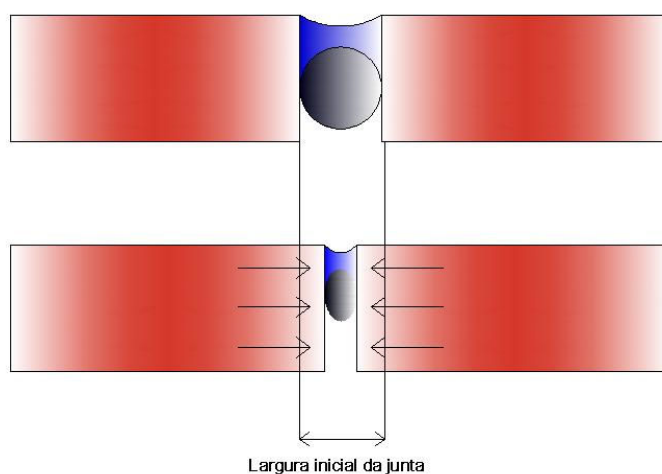


Fig. 4.3 - Movimento da junta em caso de expansão dos painéis

O contrário ocorre em caso de diminuição de temperatura, os painéis têm tendência a diminuir havendo o alargamento da junta e formando-se esforços de tracção no material de enchimento (Fig.4.4).

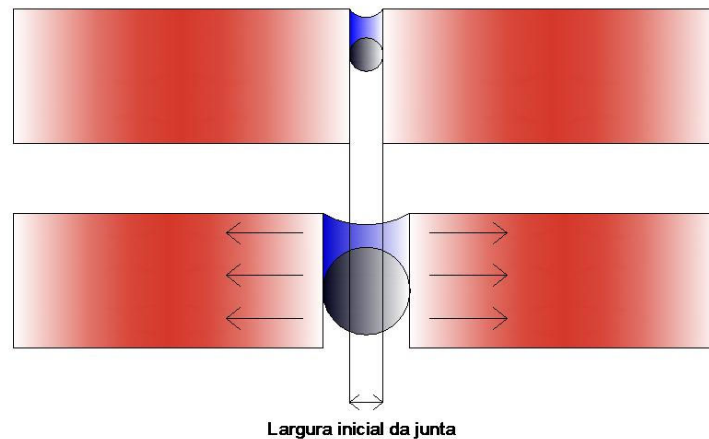


Fig. 4.4 - Movimento da junta em caso de retracção dos painéis

No decorrer do trabalho será apenas abordada a junta selada uma vez que a união de painéis de GRC recorre apenas a este tipo de ligação

#### 4.3 REQUISITOS DE DESEMPENHO EM JUNTAS SELADAS

As juntas seladas devem satisfazer vários requisitos de desempenho relacionados com a sua durabilidade, dissipação de tensões, estanqueidade e estética [23].

Uma das maiores dificuldades nas juntas seladas é conseguir que ela apresente durabilidade elevada possibilitando desta forma um funcionamento eficaz ao longo de vários anos. São inúmeros os factores que põem em causa a integridade da junta, tais como, a foto-degradação causada pelos raios ultra-violetas e ciclos de aquecimento e arrefecimento em conjunto com a acção da água [23]. Outros factores que podem diminuir a durabilidade destes sistemas relacionam-se com falhas humanas, quer ao nível da fase de projecto como no decorrer da sua execução.

É preciso ter cuidados especiais na fase de projecto escolhendo os materiais adequados para o enchimento destas zonas e dimensionando adequadamente com base na previsão dos movimentos esperados com as alterações térmicas a que os materiais estarão sujeitos. Por outro lado também é necessário uma execução correcta e cuidadosa. Segundo Fabiana Ribeiro, “a durabilidade das juntas preenchidas por sistema selante é alcançada, sobretudo, quando se alia à adequada especificação do selante e demais constituintes da junta, uma criteriosa aplicação dos materiais” [23].

A bibliografia da especialidade indica que em condições normais o tempo de vida de uma junta varia entre 7 a 10 anos para juntas de uretano e aproximadamente 20 anos para juntas de silicone. Também é referido que devem ser alvo de inspecção quando atingirem 75% do tempo útil para controlar potenciais degradações e possíveis falhas que necessitem de ser reparadas [24].

O requisito de desempenho ao nível de dissipação de tensões já foi abordado anteriormente quando foi explicado o fenómeno de migração das tensões geradas nos painéis através da deformação do material

de enchimento das juntas. É necessário que a junta mantenha-se sempre a capacidade de acomodar os movimentos ocorridos na fachada, caso contrário dará origem ao aparecimento de anomalias na envolvente.

Uma das funções das juntas é impedir a entrada de água e do ar. Para que tal ocorra é necessário que o material de enchimento mantenha as suas propriedades, isto é, não ocorra deterioração dos materiais constituintes do selante e evitar abertura de falhas devido a problemas de coesão e adesão. Os problemas de coesão materializam-se na ruptura interna do selante e normalmente deriva de um movimento maior do que a capacidade de movimentação do material de enchimento permite. As falhas por adesão são mais comuns do que as anteriores e resultam da quebra de ligação do selante à superfície de contacto do painel.

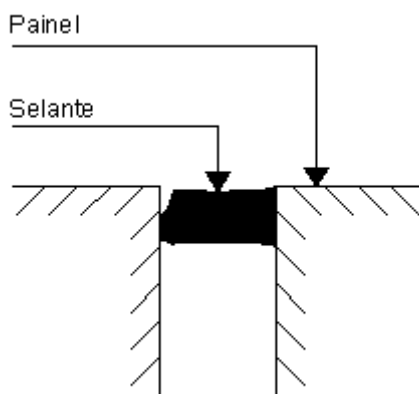


Fig. 4.5 - Falha por adesão

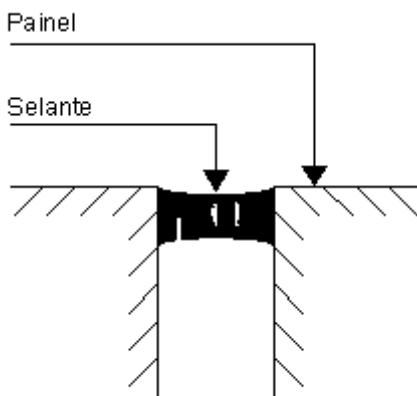


Fig. 4.6 - Falha por coesão

Ao nível estético a junta requer cuidados uma vez que é uma zona muito visível. O mercado fornece alternativas que permitem minimizar o seu impacto visual, como por exemplo a ampla diversidade de cores existentes para os selantes que permitem aproximar a sua tonalidade à cor dos painéis. Também se pode recorrer à alteração da localização da junta através da aplicação de juntas reentrantes que consistem na aplicação do material selante na parte mais interna da junta ou pela colocação em ranhuras ou reentrâncias dos painéis. As juntas reentrantes trazem vantagens não só de nível estético

como também aumentam a durabilidade do selante uma vez que está mais protegidas das acções externas ao sistema. De qualquer forma convém ter em mente que os requisitos arquitectónicos não devem por em causa o desempenho mecânico da junta.

Para um melhor entendimento das particularidades desta zona será a seguir analisado os vários constituintes que compõem a junta, metodologia de execução e critérios de selecção.

#### 4.4 CONSTITUIÇÃO DA JUNTA SELADA

Os elementos que fazem parte das juntas seladas são o primário, o limitador de junta e o material de enchimento (usualmente designado de selante). A figura 4.7 mostra alguns dos constituintes mencionados anteriormente e respectiva localização:

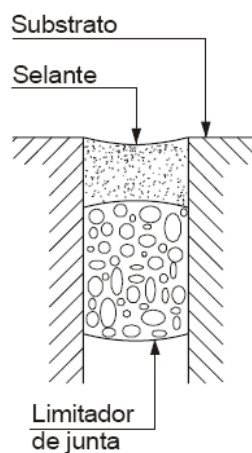


Fig. 4.7 - Constituintes de juntas seladas [22]

O primário é um produto que se aplica sobre a superfície lateral do painel em que o selante irá aderir. A sua aplicação é feita antes da injeção do selante sendo desta forma o primeiro elemento a ter em conta na fase de execução da junta selada. O primário é utilizado para aumentar a adesão entre o selante e o painel, preencher os poros da superfície, fortalecer as áreas fracas e reduzir a pressão por capilaridade da humidade através das superfícies dos painéis [22]. Em situações específicas é possível a não utilização de primário para a execução da junta.

O passo seguinte na execução da junta é a inserção do limitador de junta, que consiste em uma peça de material compressível normalmente de polietileno ou de poliestireno. O polietileno normalmente é o material mais adequado porque apresenta melhor compatibilidade com o selante e o primário e adequa-se mais eficazmente aos movimentos de expansão e contracção da junta.

As funções do limitador de junta são:

- Permitir controlar mais facilmente a profundidade desejada para a junta especificada em projecto evitando desta forma a utilização de quantidades superiores à necessária de selante;
- Permitir que o selante não adira à terceira face, face do limitador de junta, permitindo um comportamento mais adequado do selante a movimentos de expansão e retracção uma vez

que quando existe adesão às três faces pode ocorrer tensões no selante provocando a ruptura do mesmo por falha de coesão ou de adesão;

- Proteger e apoiar o selante durante a sua aplicação.

No mercado existem vários diâmetros de limitadores de profundidade e são comercializados na forma de cordões cilíndricos. O seu diâmetro deve ser aproximadamente superior a 25% da largura da junta [25]



Fig. 4.8 - Limitador de junta [26]

A sua colocação é feita através da compressão lateral do cordão contra os lábios da junta. A profundidade de inserção do cordão é controlado através do recurso de um elemento auxiliar normalmente de madeira (bitola) como mostra a figura seguinte:

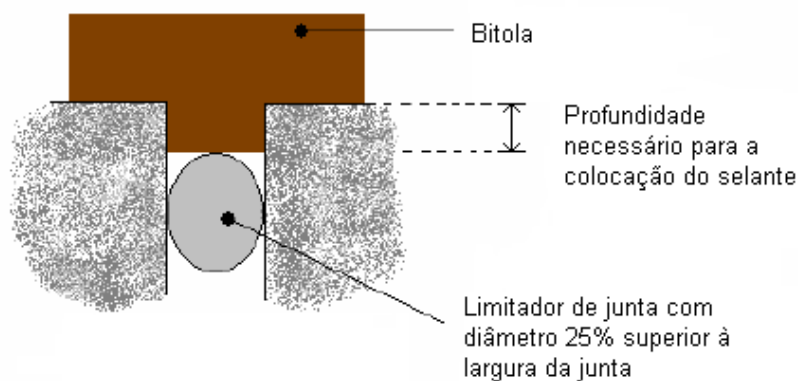


Fig. 4.9 - Colocação do limitador de junta

Por fim na última fase de execução da junta é colocado o material de enchimento normalmente designado por selante. Os selantes são produtos à base de polímeros que possuem capacidade de se deformar e variar as suas dimensões quando sujeitos a esforços de tensão de forma a assegurar a união entre os elementos, não pondo em causa a estanqueidade do sistema e a sua durabilidade. Existem vários tipos de selantes no mercado apresentando características distintas.

Os selantes podem ser classificados como monocomponentes ou bicomponentes. Os primeiros são produtos que curam ou adquirem a forma final quando entram em contacto com o meio ambiente, por secagem ou pela acção da humidade, exigindo um tempo de cura maior do que o bicomponente. Este tipo de selante é comercializado geralmente em tubos, pronto a ser aplicado.

Os selantes bicomponentes são misturados no local de utilização antes da sua aplicação existindo desta forma possibilidades de erro nas proporções dos componentes acrescentados que poderão causar falhas no seu comportamento. Outra característica deste tipo de selante é exigir tempo de cura mais baixo.

Tendo como base de classificação a sua viscosidade podem ser classificados em autonivelantes ou tixotrópicos. Os autonivelantes são produtos de baixa viscosidade, cuja fluidez sob a acção da gravidade permite que se moldem à secção da junta sendo desta forma só utilizados para a execução de juntas em planos horizontais. Os tixotrópicos contêm uma viscosidade superior permitindo assim a sua aplicação em superfícies verticais, inclinadas e horizontais.

Quanto ao seu comportamento podem ser classificados em quatro tipos:

- Elásticos – caracterizam-se pelo seu comportamento elástico, isto é, sofrem deformações proporcionais às tensões que estão submetidos, retomando após a anulação da tensão à sua dimensão inicial;
- Elasto-plásticos – apresentam um comportamento predominantemente elástico, mas tendem a atingir o regime plástico quando submetidos a tensões por longo período de tempo ou quando são deformados acima do seu limite elástico;
- Plasto-elásticos – apresentam um comportamento predominantemente plástico mas exibem algum comportamento elástico quando submetidos a deformações de curto período ou quando são deformados abaixo do seu limite elástico;
- Plásticos – exibem deformações plásticas, ou seja, não retomam ao seu estado original após a remoção da tensão.

A norma ASTM C 920 apresentam a classificação dos selantes quanto ao tipo de aplicação e o tipo de superfície lateral nas quais o selante irá aderir (designado de substrato):

Quadro 4.1 - Classificação dos selantes elastoméricos segundo ASTM C 920 [23]

|                            |                   | Classe | Descrição                                                                                        |
|----------------------------|-------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Classificação dos selantes | Tipo de aplicação | Use T  | Selante designado para uso em áreas de tráfego de peões e veículos como ruas, parques e garagens |
|                            |                   | Use NT | Selante designado para uso em áreas não trafegáveis                                              |
|                            |                   | Use I  | Selante designado para o uso em juntas que estão sujeitas continuamente a líquidos               |
|                            | Substrato         | Use M  | Selantes para uso em substrato de argamassa                                                      |
|                            |                   | Use G  | Selantes para uso em substratos de vidro                                                         |
|                            |                   | Use A  | Selantes para uso em substratos de alumínio                                                      |
|                            |                   | Use O  | Selantes para uso em outros substratos                                                           |

Um dos parâmetros chave do selantes que deve ser tido em conta na fase de escolha do material mais adequado para enchimento da junta é a sua capacidade de movimentação. A capacidade de movimentação traduz a amplitude máxima de extensão e compressão que o selante suporta não pondo em causa o seu perfeito desempenho [27]. É determinado sujeitando o selante a ciclos de extensão e compressão através da variação da temperatura entre os  $-20^{\circ}\text{C}$  e os  $+70^{\circ}\text{C}$ . A capacidade de movimentação é expresso em percentagem da largura da junta, ou seja, um selante que tenha classe 25 significa que suporta encurtamentos e expansões na ordem dos 25% da largura da junta.

A ISO 11600 apresenta as seguintes classes para selantes empregues na indústria da construção:

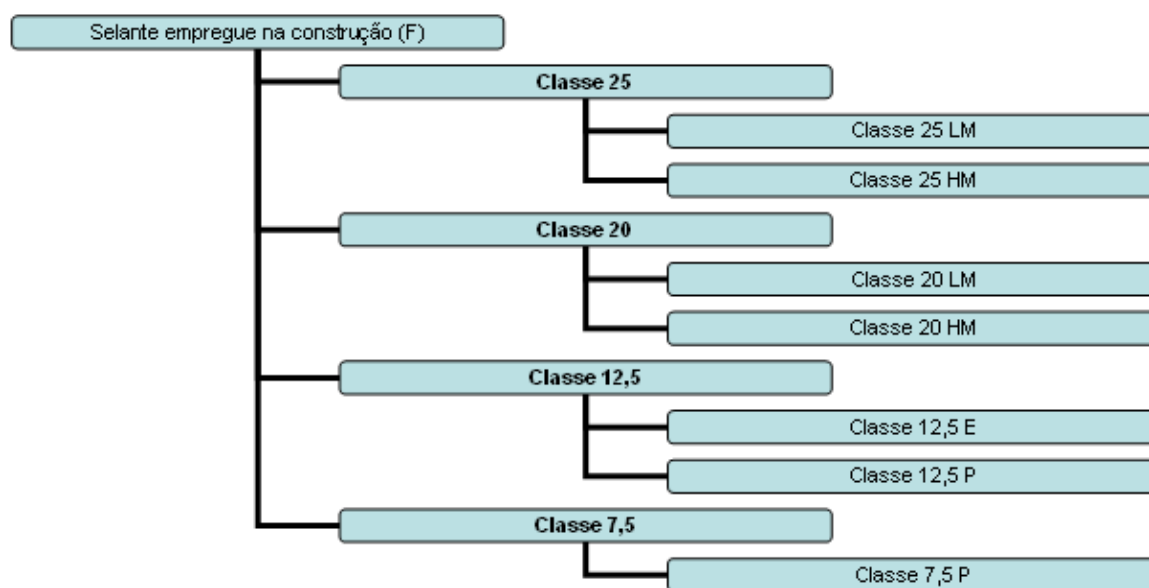


Fig. 4.10 - Classificação dos selantes com base na ISO 11600 [27]

Os selantes de classe 25 e 20 são considerados elásticos e ainda são subdivididos em alto módulo (HM) e baixo módulo (LM). Os de classe 12,5 e 7,5 são subdivididos em elásticos (E) e plásticos (P).

Existem outros parâmetros que são tomados em conta para a escolha do selante, por exemplo o seu módulo de elasticidade tendo o cuidado por optar por um material de enchimento de módulo sempre inferior.

Na união dos painéis de GRC os selantes mais usados são os elásticos podendo ser em silicões de baixo módulo, polisulfureto (mono e bicomponente) e poliuretano (mono e bicomponente) [28].

Para minimizar a hipótese de erro é importante que os fabricantes dos vários constituintes indiquem as especificações técnicas dos produtos ao projectista que posteriormente devem ser transmitidas por este ao executor responsável pela materialização dos trabalhos de execução das juntas.

#### 4.5 DIMENSIONAMENTO DE JUNTAS SELADAS

As directrizes e os critérios aplicados no dimensionamento das juntas influenciam fortemente a durabilidade e o comportamento mecânico do material selante. São vários os cuidados a ter em conta na fase de projecto de forma a evitar que a união dos painéis ponha em causa a eficácia geral do edifício. A escolha não deve recair apenas nas razões arquitectónicas mas também deve ter em conta o custo, as tolerâncias de montagem, as dimensões nominais dos painéis e suas variações, a capacidade de deformação do selante e a sua temperatura de aplicação, a orientação e as condições climáticas.

O PCI (Precast Concrete Institute) [1], indica uma série de recomendações para o correcto dimensionamento de juntas em painéis de GRC. Seguidamente será apresentado as mais relevantes.

Em termos de profundidade das abas laterais dos limites dos painéis é recomendado uma medida nunca inferior a 38 mm, sendo preferível adoptar 50 mm.

Considerando apenas as dificuldades práticas de instalação, o espaçamento mínimo entre juntas deve ser pelo menos 19 mm.

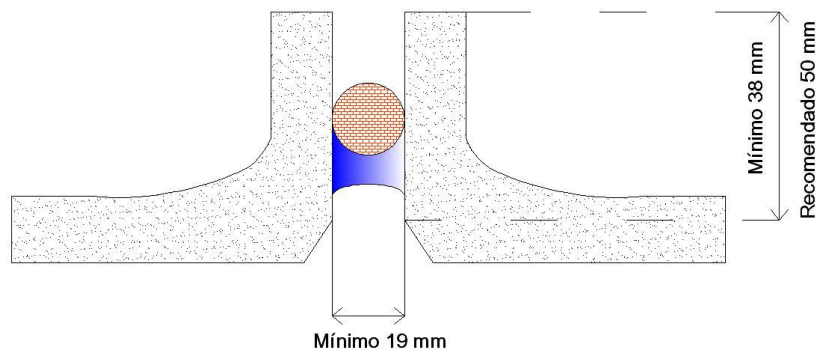


Fig. 4.11 - Dimensões típicas de junta entre painéis

Em arestas de canto do edifício as juntas devem ter pelo menos 25 mm de largura para acomodar as deformações acumuladas, os empenamentos e desalinhamentos frequentes nos encontros de planos de fachada.

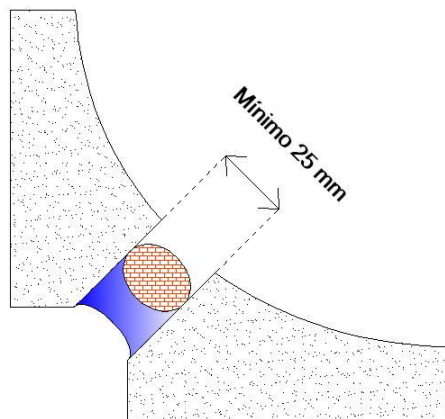


Fig. 4.12 - Dimensões típicas de junta entre painéis de canto

A profundidade do selante depende da largura da junta, sendo prática aceitável adoptar o seguinte critério:

- Para juntas de largura entre 13 mm e 25 mm a profundidade do selante é igual a metade da largura da junta;
- Para juntas de largura superior a 25 mm utilizar um máximo de 13 mm de profundidade.

Mas o dimensionamento final terá que ter em conta muitos outros factores como foi mencionado anteriormente. O procedimento prático recomendado pelo PCI [1] para o dimensionamento de juntas é feito através da seguinte expressão:

$$J = \frac{(100 A)}{X} + B + C \quad (4.1.)$$

$$A = c \times \Delta t \times l \quad (4.2.)$$

em que:

J – largura mínima da junta [mm]

X – capacidade elástica de movimentação do selante em percentagem [%]

A – movimentação calculada do painel para as variações térmicas [mm]

B – tolerâncias de construção do material [mm]

C – considerações sísmicas ou outras que se considerem apropriadas [mm]

c – coeficiente dilatação térmico [mm/mm/°C]

$\Delta t$  – variação térmica [°C]

l – comprimento do painel [mm]

Vamos tomar como exemplo um painel com 3 metros de comprimento, uma variação de temperatura de 30 °C e uma tolerância de construção de 6 mm. O coeficiente de dilatação térmica do GRC depende da matriz de cimento, variando entre  $10 \times 10^{-6}$  e  $20 \times 10^{-6}$  mm/mm°C [13]. Para o cálculo vai-se adoptar o valor de  $20 \times 10^{-6}$  mm/mm°C. Assumindo um selante com capacidade elástica de movimentação de 25% (pode ser determinado através da ASTM C719) para o preenchimento da junta, tem-se que:

$$A = 20 \times 10^{-6} * 30 * 3000 = 1,8mm$$

$$J = \frac{100 * 1.8}{25} + 6 = 13.2 mm$$

Neste caso seria recomendado usar juntas com largura de 19 milímetros pelas razões de instalação. Deve-se evitar juntas subdimensionadas para não ocorrerem tensões de tracção capazes de provocar falhas de aderência ou ruptura do selante ou para as peças adjacentes não entrarem em contacto submetendo-as a esforços que podem levar a distorções, fissuras e esmagamentos localizados.

Se a junta determinada fosse demasiada larga, recomendava-se o uso de selantes com capacidade elástica superior, conseguindo assim diminuir a largura mínima a colocar entre painéis.

Como foi referido anteriormente a profundidade do selante depende da largura da junta. Neste caso a profundidade seria igual a metade da largura, ou seja, seria necessário aplicar 9,5 mm de selante. Este valor é regulado pelo emprego de um limitador de junta com superfície não adesiva que após posicionado permanece comprimido.

Depois de aplicado o selante, ele deve ser moldado segundo uma secção que permita bordas espessas combinado com uma faixa central mais fina maximizando desta forma a área de aderência.

Convém salientar que também é norma na indústria de GRC utilizar dimensões padrão fornecidas pelos fabricantes dos materiais constituintes da junta, que se aproximam dos valores obtidos pelas recomendações do PCI.

Quadro 4.2 - Dimensões padrão para juntas entre painéis de GRC

| Distância entre juntas       | 2 m   | 2 m – 3,5 m | 3,5 m – 5 m |
|------------------------------|-------|-------------|-------------|
| Largura de projecto da junta | 15 mm | 20 mm       | 25 mm       |
| Largura mínima da junta      | 10 mm | 15 mm       | 20 mm       |
| Profundidade da junta        | 8 mm  | 10 mm       | 12 mm       |



# 5

## PONTES TÉRMICAS

### 5.1 DEFINIÇÃO

Segundo a norma EN-ISO 10211, uma ponte térmica é toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à zona corrente [29]. Estas zonas têm características ao nível de resistência térmica inferiores à da restante envolvente do edifício, conduzindo desta forma a perdas localizadas de calor superiores. Esta alteração pode ser causada por vários factores, tais como:

- A existência de zonas com elementos estruturais que conduz a locais com resistência térmica inferior à zona corrente;
- Ao uso de materiais com condutibilidades térmica diferente na envolvente do edifício;
- Situações com problemas nas ligações entre elementos da construção;
- Zonas onde o isolamento térmico é interrompido;
- Mudança na espessura dos elementos construtivos.

A existência de pontes térmicas na envolvente do edifício vai provocar, ao longo da estação de aquecimento e em condições de regime permanente, dois fenómenos:

- A densidade do fluxo de calor é mais elevada na zona da ponte térmica;
- A temperatura superficial interior é inferior à da zona corrente.

Estes fenómenos têm consequências indesejáveis no que diz respeito ao consumo de energia para aquecimento e ao risco de determinadas anomalias no edifício. Os problemas associados a pontes térmicas surgiram em maior número e de forma mais penosa após a introdução de isolamentos térmicos na caixa-de-ar dos paramentos exteriores e pela dificuldade construtiva de se aplicar isolamentos contínuos [30].

Na actualidade já existe uma preocupação maior no tratamento das pontes térmicas mas mesmo assim ainda existe um longo caminho a percorrer. Muitos derivam de falhas de projecto ou por erros na fase de execução, sendo muito mais difícil e dispendiosa a reparação após a conclusão da obra.

São várias as zonas a ter em atenção, em termos de pontes térmicas, na fase de concepção, nomeadamente:

- Os elementos estruturais como topo de lajes, vigas e pilares;
- Vãos e caixas de estores.

A figura 5.1 mostra exemplos de zonas mais frágeis termicamente onde normalmente ocorrem pontes térmicas.

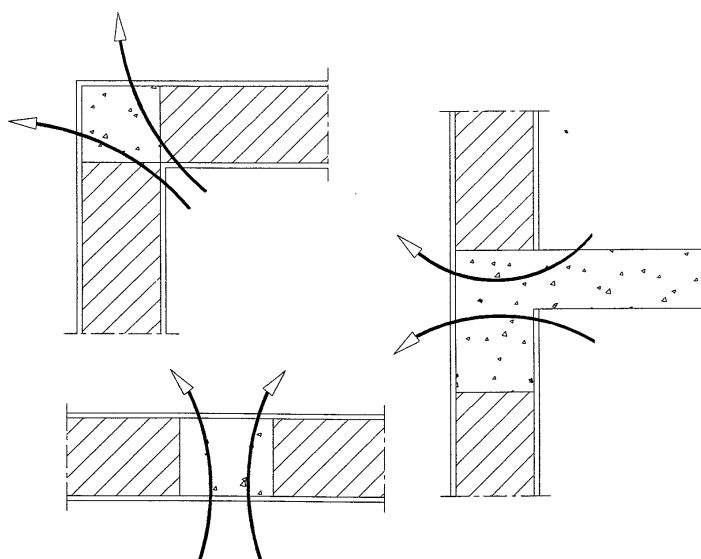


Fig. 5.1 - Exemplos de ponte térmica [31]

Outra zona que é muito sensível à ocorrência de pontes térmicas são as juntas de painéis pré-fabricados e que na maior parte dos casos não é levado em conta. Através da termografia é possível observar o comportamento térmico e localizar as zonas de ponte térmica neste tipo de construção. Este método recorre a aparelhos de infravermelhos que permitem registar as diferenças de temperaturas ao longo da envolvente do edifício. A figura 5.2 representa uma fotografia e o termograma do respectivo edifício sendo desta forma facilmente identificável os pontos críticos neste tipo de construção.



Fig. 5.2 - Fotografia e respectivo termograma de um edifício pré-fabricado [32]

Relativamente ao termograma, convém mencionar que as zonas quentes correspondem às manchas claras enquanto que as zonas frias correspondem às cores mais escuras.

Anteriormente foi mencionado que a ponte térmica produzia um abaixamento da temperatura superficial interior relativamente à restante envolvente. Este abaixamento provoca uma elevação da temperatura superficial exterior, permitindo desta forma localizar as zonas de ponte térmica pelas manchas claras no termograma. O edifício em causa foi construído com painéis pré-fabricados tipo sanduíche de betão e com material de isolamento no seu interior. O termograma salienta as zonas frágeis como sendo as juntas e as faixas periféricas dos painéis, uma vez que existe descontinuidade ao nível de isolamento térmico.

Pelo exposto anteriormente é de esperar que em edifícios construídos com painéis de GRC do tipo sanduíche o comportamento seja muito semelhante e apresente nas mesmas zonas semelhantes fragilidades térmicas.

Por isso torna-se relevante para o trabalho fazer um estudo mais detalhado sobre o comportamento das pontes térmicas e a regulamentação existente a nível nacional que limita o comportamento térmico destas zonas.

## 5.2 TIPOS DE PONTES TÉRMICAS

Devido às inúmeras especificidades de pontes térmicas é necessário fazer uma classificação dos diversos tipos existentes na construção [32], que são:

- Pontes térmicas concentradas ou pontuais;
- Pontes térmicas lineares.

Nas pontes térmicas concentradas ou pontuais as três dimensões têm ordem de grandeza semelhante, como por exemplo o vértice de união entre três elementos planos.

Nas pontes térmicas lineares uma das dimensões tem grandeza superior relativamente às outras duas. Uma vez que a maioria dos casos existentes se encaixam neste grupo ainda será feita uma subdivisão em pontes térmicas planas e pontes térmicas não planas.

As pontes térmicas planas possuem superfícies interiores e exteriores planas, de área igual e paralelas entre si. Alguns exemplos deste tipo são a existência de um pilar no plano da parede ou a interrupção do isolamento no plano da parede.

As pontes térmicas não planas são aquelas em que pelo menos uma das características mencionadas nas pontes térmicas planas não se verifica. Neste exemplo encaixa-se a maioria dos casos, como é o caso de:

- Ligação parede interior e exterior;
- Ligação entre caixilharia e parede;
- Ligação entre a caixa de estores e a parede exterior;
- Elementos construtivos em contacto com o solo.

É importante salientar que no Regulamento das Características de Comportamento Térmico as pontes térmicas planas mencionadas anteriormente recebem a mesma denominação e o seu cálculo é feito com base na consideração que o fluxo de calor é unidimensional e na direcção normal ao elemento. A

ponte térmica não plana no regulamento é designado de ponte térmica linear e considera-se uma condução bidimensional.

### 5.3 CONSEQUÊNCIAS DA EXISTÊNCIA DE PONTES TÉRMICAS

#### 5.3.1 INTRODUÇÃO

As zonas de ponte térmica apresentam um comportamento distinto relativamente à restante envolvente exterior e estão na origem de diversas implicações negativas como é o caso de:

- Incremento das perdas térmicas;
- Agravamento das condensações superficiais;
- Potenciamento do desenvolvimento de fungos e bolores;
- Heterogeneidade das temperaturas superficiais interiores.

A seguir será feita uma análise mais detalhada dos problemas inerentes a este tipo de comportamento recorrendo sempre que necessário a exemplos elucidativos.

#### 5.3.2 INCREMENTO DAS PERDAS TÉRMICAS

Quando existe um diferencial ao nível de temperaturas entre dois corpos este tende a anular-se, caminhando ao encontro do equilíbrio. Este equilíbrio é obtido através da transferência térmica do corpo que se encontra quente para o mais frio, dando origem à transferência de calor (fluxo de calor) por um processo de difusão.

Os paramentos da fachada estão sujeitos a fenómenos de transferência de calor, apresentando as zonas de ponte térmica como pontos frágeis uma vez que têm resistências térmicas inferiores comparativamente à restante envolvente. Desta forma em condições de Inverno, a transferência de calor ao longo das pontes térmicas será superior, pondo por vezes em causa a eficácia do edifício ao nível das exigências de conforto e economia.

#### 5.3.3 AGRAVAMENTO DO RISCO DE CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS

O ar no interior dos edifícios contém uma determinada quantidade de vapor de água a que corresponde um valor mínimo de temperatura abaixo do qual ocorrem condensações, denominada temperatura ponto de orvalho.

No período de aquecimento, a face interior da envolvente encontra-se a uma temperatura inferior à do ambiente interior. A seguir será demonstrado que a temperatura superficial interior varia em função das trocas por radiação e convecção entre a face interior do elemento e o contorno, do coeficiente de transmissão térmica (U) e do gradiente de temperatura instalado.

Considerando um elemento de separação entre os dois ambientes, um interior e outro exterior, com temperaturas interiores superiores às registadas exteriormente e cujas temperaturas superficiais interior ( $\theta_{si}$ ) e exterior ( $\theta_{se}$ ) obedeçam às seguintes condições:

$$\theta_{si} < t_i \quad (5.1.)$$

$$\theta_{se} > t_e \quad (5.2.)$$

As trocas de calor entre o ambiente interior e exterior podem ser sintetizadas, considerando transmissão de calor unidireccional em regime permanente [33], através da seguinte relação:

$$q = U \cdot (t_i - t_e) \quad (5.3.)$$

em que:

$q$  – fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$U$  – coeficiente de transmissão térmica do elemento [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$ ]

$t_i$  – temperatura do ambiente interior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_e$  – temperatura do ambiente exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Vamos abordar a troca de calor entre dois ambientes (interior e exterior) separados por um elemento construtivos.

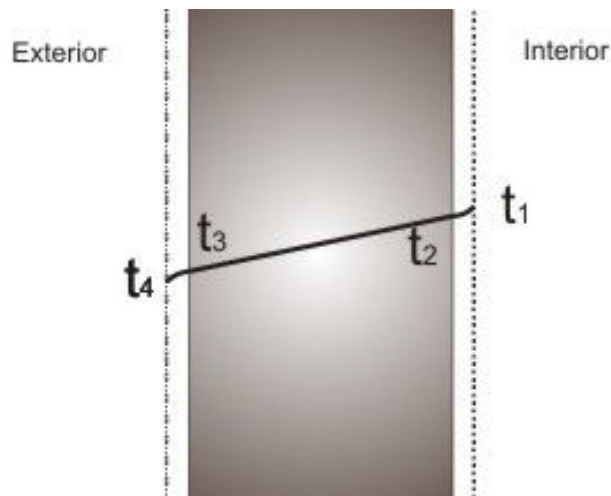


Fig. 5.3 - Trocas de calor entre dois ambientes

Considerando que:

$$t_4 = t_e$$

$$t_3 = t_{se}$$

$$t_2 = t_{si}$$

$$t_1 = t_i$$

Como o fluxo de calor que atravessa a parede é constante, em regime permanente e sem geração de calor no interior, pode ser feita a seguinte relação:

$$q_{14} = q_{12} \quad (5.4)$$

$$U_{14} \times (t_1 - t_4) = U_{12} (t_1 - t_2) \quad (5.5)$$

$$U_{14} \times (t_1 - t_4) = \frac{1}{h_i} (t_1 - t_2) \quad (5.6)$$

$$t_2 = t_1 - \frac{U}{h_i} (t_1 - t_4) \quad (5.7)$$

Ou seja:

$$\theta_{si} = t_i - \frac{U}{h_i} (t_i - t_e) \quad (5.8)$$

em que:

$\theta_{si}$  – temperatura superficial interior [°C]

$t_i$  – temperatura do ambiente interior [°C]

$U$  – coeficiente de transmissão térmica do elemento [W/(m<sup>2</sup>°C)]

$h_i$  – condutância térmica superficial interior [W/(m<sup>2</sup>°C)]

$t_e$  – temperatura do ambiente exterior [°C]

As zonas de ponte térmica são mais sensíveis à ocorrência de condensações superficiais devido à menor resistência térmica, tendo desta forma temperaturas superficiais interiores inferiores à restante envolvente e alcançando desta forma mais facilmente a temperatura ponto de orvalho.

Como exemplo, considere-se um paramento exterior construído por painéis de GRC do tipo sanduíche, composto por duas camadas de 10 mm de GRC e um núcleo central de poliestireno expandido moldado de 110 mm.

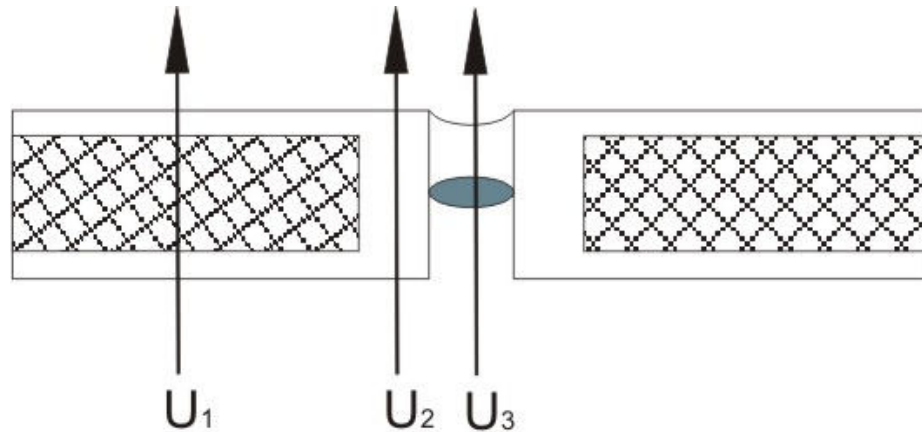


Fig. 5.4 - Trocas de calor no painel sanduíche de GRC

Neste exemplo existem três coeficientes de transmissão térmica diferente, o da zona corrente ( $U_1$ ) é da ordem de  $0,34 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , no limite da placa de GRC ( $U_2$ ) é próximo de  $2,91 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$  e na junta ( $U_3$ ) vale  $1,7 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

Considerando que o ar interior apresenta uma temperatura interior de  $18^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa de 75% e que a temperatura exterior ronda os  $5^\circ\text{C}$ , a temperatura ponto de orvalho nestas condições é de  $13,5^\circ\text{C}$  (valor obtido através do recurso ao diagrama psicrométrico). Recorrendo a fórmula 5.8 e substituindo pelas condições existentes obtém-se as seguintes temperaturas superficiais para as diferentes regiões do painel:

$$\theta_1 = 18 - 0,34 \times 0,13 \times (18 - 5) = 17,4^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = 18 - 2,91 \times 0,13 \times (18 - 5) = 13,1^\circ\text{C}$$

$$\theta_3 = 18 - 1,7 \times 0,13 \times (18 - 5) = 15,1^\circ\text{C}$$

Como se conclui apenas no limite da placa de GRC, na zona maciça, é que a temperatura superficial é inferior a temperatura ponto de orvalho havendo desta forma condensação de água ao longo desta superfície.

Também convém referenciar que a zona da junta é muito sensível à condensação e que em situações mais extremas dos ambientes circundantes é muito provável que ocorra condensações ao longo da sua região.

Este exemplo fornece uma ideia das zonas mais frágeis das fachadas de GRC com painéis sanduíches, indicando as regiões que requerem principais cuidados por parte dos projectistas de forma a evitar anomalias e quedas de eficiência nos edifícios.

#### 5.3.4 POTENCIAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DE FUNGOS E BOLORES

Os materiais de construção civil são susceptíveis à colonização de microrganismos capazes de acelerar o mecanismo de envelhecimento do material até à sua deterioração. O seu crescimento está fortemente

relacionado com as condições ambientais a que estão expostos. O principal factor é a humidade elevada, tornando desta forma as zonas onde ocorrem condensações superficiais mais passíveis ao desenvolvimento de fungos e bolores. A ausência de luz solar directa também potencia o seu crescimento, sendo esta condição normalmente garantida devido à geometria dos espaços.

Existem outras condições necessárias para o aparecimento de fungos e bolores, mas uma vez que a intenção é demonstrar que as zonas de ponte térmica são as mais vulneráveis a este tipo de ataque apenas vamos enumerar uma série de factores que também fazem parte mas que normalmente estão presentes na globalidade do edifício não tendo desta forma interesse a exposição mais exaustiva, que são:

- Quantidade suficiente de oxigénio;
- Condições nutritivas adequadas fornecidas muitas vezes pelos constituintes da argamassa dos revestimentos;
- Ar calmo.

A figura 5.5 mostra o termograma da superfície interior da ligação entre duas paredes e a laje, e respectiva fotografia onde é evidente a formação de bolores.

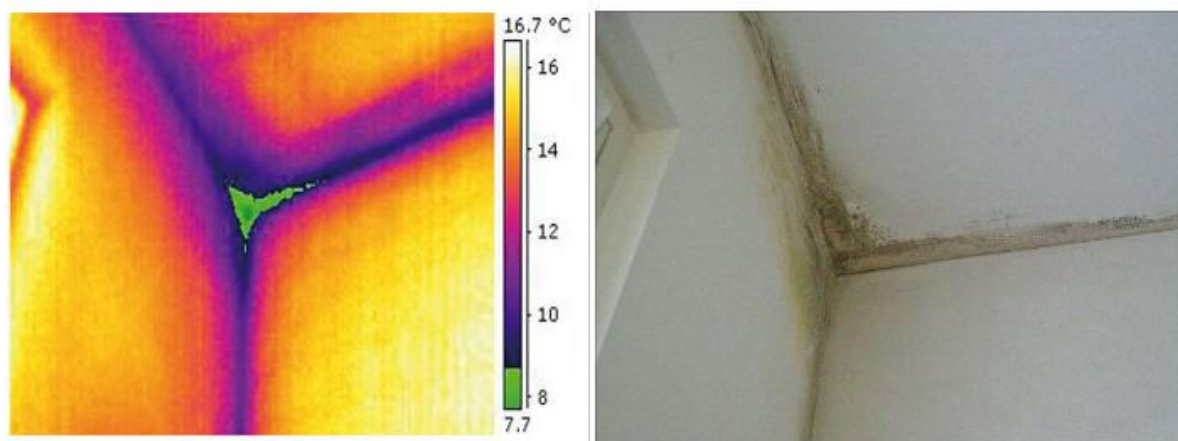


Fig. 5.5 - Termograma e fotografia de uma zona de ponte térmica [34]

Como se observa pelo termograma na zona dos pilares e viga ocorre uma maior transmissão de calor devido à sua menor resistência térmica. Desta forma as temperaturas superficiais interiores são mais baixas nestas regiões relativamente à restante envolvente, alcançando assim mais facilmente a temperatura ponto de orvalho que provocará a condensação nestas zonas e consequentemente formação de bolores e fungos.

Torna-se necessário combater este tipo de patologia, quer pela alteração estética que perturba o edifício quer pelos problemas de saúde que pode trazer aos seus ocupantes.

#### 5.3.5 HETEROGENEIDADE DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERIORES

Como se abordou anteriormente, a temperatura superficial interior varia ao longo da fachada, sendo inferior nas zonas de ponte térmica. Esta heterogeneidade na distribuição da temperatura superficial na

envolvente potencia a manifestação de diversos acontecimentos indesejáveis ao nível de aspecto visual. Um exemplo é o desenvolvimento de fenómenos de termoforese que consiste no aparecimento de manchas em zonas do revestimento. Esta patologia resulta da deposição desigual do pó nas zonas mais frias, pois verifica-se uma maior aderência das poeiras em suspensão no ar, e pela retenção diferencial da humidade. Pelo exposto verifica-se que a probabilidade do aparecimento de manchas, usualmente denominadas de “fantasmas”, será maior nas zonas de ponte térmica.

Outro fenómeno indesejável devido à heterogeneidade de temperaturas é a ocorrência de fissuração dos revestimentos que resultam dos movimentos diferenciais de origem térmica.

## 5.4 REGULAMENTAÇÃO

Ao longo deste trabalho a análise do problema das pontes térmicas será feita recorrendo à legislação em vigor existente em Portugal, que é o Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril de 2006 sob a designação de Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [35]. Este regulamento deriva da revisão do Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro como forma de resposta às mudanças verificadas no nosso País relativamente aos hábitos de consumo de energia no sector dos edifícios e à necessidade de implementação da Directiva Europeia, publicada a 4 de Janeiro de 2003, relativa ao desempenho energético dos edifícios – 2002/91/CE, de 16 de Dezembro de 2002.

Este regulamento tem como objectivos principais [36]:

- Satisfazer as exigências de conforto térmico nos edifícios, sejam elas de aquecimento ou arrefecimento, e de ventilação para garantia da qualidade do ar interior, bem como as necessidades de água quente sanitária, sem dispêndio excessivo de energia;
- Minimizar as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, com potencial impacto negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior;

Este regulamento alarga as suas exigências ao definir claramente objectivos que os projectistas devem obrigatoriamente satisfazer [37]. Na etapa seguinte será feita uma síntese dos parâmetros e requisitos mínimos regulamentares expressos neste documento que digam respeito às pontes térmicas.

### 5.4.1 COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

O coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de um elemento da envolvente representa a quantidade de calor que o atravessa perpendicularmente, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre os ambientes que separa, sendo calculado pela expressão:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (5.9)$$

em que:

$U$  – coeficiente de transmissão térmica [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ];

$R_{si}$  - resistência térmica superficial interior [(m<sup>2</sup>. °C)/W];

$R_j$  - resistência térmica da camada  $j$  [(m<sup>2</sup>. °C)/W];

$R_{se}$  - resistência térmica superficial exterior [(m<sup>2</sup>. °C)/W].

Caso a envolvente seja constituída por camadas homogêneas o cálculo da resistência térmica pode ser calculado pelo quociente entre a espessura da camada e a o valor de cálculo da condutibilidade térmica do material, como indica a seguinte expressão:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (5.10)$$

em que:

$R_j$  - resistência térmica da camada  $j$  [(m<sup>2</sup>. °C)/W];

$d_j$  - espessura da camada  $j$  [m];

$\lambda_j$  - condutibilidade térmica do material da camada  $j$  [W/(m.°C)]

O cálculo da resistência térmica dos materiais correntes de construção e de camadas não homogêneas que compõem os elementos construtivos também pode ser determinada através do recurso a bibliografia da especialidade como é o caso da publicação do LNEC *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios* [38]. Em alternativa o valor deste parâmetro térmico também pode ser determinado através dos princípios de cálculos definidos nas normas europeias EN ISO 6949 e EN ISO 13789.

As resistências térmicas superficiais traduzem o efeito da convecção e da radiação e varia em função de certos factores. No anexo VII do RCCTE indicam valores a ser utilizados em função da posição do elemento construtivo e do sentido do fluxo de calor.

Quadro 5.1 - Resistências térmicas superficiais [35]

| Sentido do fluxo de calor | Resistência térmica superficial [m <sup>2</sup> °C/W] |                                |                      |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
|                           | Exterior<br>$R_{se}$                                  | Local não aquecido<br>$R_{se}$ | Interior<br>$R_{si}$ |
| Horizontal                | 0,04                                                  | 0,13                           | 0,13                 |
| Vertical                  |                                                       |                                |                      |
| Ascendente                | 0,04                                                  | 0,10                           | 0,10                 |
| Descendente               | 0,04                                                  | 0,17                           | 0,17                 |

#### 5.4.2 COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR

O coeficiente de transmissão térmica linear ( $\psi$ ) representa a quantidade de calor transmitida ao longo da ligação entre elementos construtivos ou elementos enterrados por unidade de tempo, quando sujeitos a um gradiente de temperatura unitário entre os ambientes que separa.

Através do coeficiente de transmissão térmica linear calcula-se as perdas de calor através das pontes térmicas lineares pela seguinte expressão:

$$L_{pt} = \sum \psi_j \cdot B_j \quad (5.11)$$

em que:

$L_{pt}$  – perdas de calor por diferença de temperatura [W/°C];

$\psi_j$  – coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica  $j$  [W/(m.°C)];

$B_j$  – desenvolvimento linear da ponte térmica  $j$  medido pelo interior [m].

Para efeito do Regulamento, a análise limita-se às pontes térmicas bidimensionais e são indicados valores de  $\psi$  para os casos mais correntes da construção em Portugal, que são:

- Perdas por pavimentos e paredes em contacto com o solo;
- Perdas devidos às ligações entre elementos construtivos:
  - Ligação da fachada com os pavimentos térreos;
  - Ligação da fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos ou exteriores;
  - Ligação da fachada com pavimentos intermédios;
  - Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço;
  - Ligação da fachada com varanda;
  - Ligação entre duas paredes verticais;
  - Ligação da fachada com caixas de estores;
  - Ligação da fachada com padieira, ombreira ou peitoril.

Para situações distintas às enumeradas anteriormente o valor de  $\psi$  pode ser determinado de acordo com as metodologias descritas nas normas europeias EN 13370 ou EN 10211-1, respectivamente no caso de elementos em contacto com o terreno e de ligações entre elementos construtivos.

O Regulamento ainda permite a adopção de um valor convencional  $\psi=0,5$  W/(m.°C) para elementos não enterrados, mas normalmente esta solução é penalizadora sendo desta forma aconselhável sempre o seu cálculo por parte dos projectista.

### 5.4.3 REQUISITOS MÍNIMOS REGULAMENTARES

Nesta fase apenas vão ser mencionadas as verificações exigidas pelo Regulamento em que as pontes térmicas têm interferência e que podem por em causa a verificação das exigências de comportamento térmico.

De forma a controlar a qualidade térmica dos edifícios no anexo IX o regulamento impõe valores máximos de coeficientes de transmissão térmica em elementos opacos que devem ser respeitados na envolvente dos edifícios, quer em zona corrente como nas zonas de ponte térmica plana.

Quadro 5.2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos [W/m<sup>2</sup> °C] [35]

| Elemento da envolvente                |                          | Zona climática |                |                |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                       |                          | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | I <sub>3</sub> |
| Elementos exteriores em zona corrente | Zona opacas verticais    | 1,8            | 1,60           | 1,45           |
|                                       | Zonas opacas horizontais | 1,25           | 1              | 0,90           |
| Elementos interiores em zona corrente | Zona opacas verticais    | 2              | 2              | 1,90           |
|                                       | Zonas opacas horizontais | 1,65           | 1,30           | 1,20           |

Como se verifica os valores máximos dependem da zona climática, sendo a divisão de Portugal continental feita da seguinte forma:

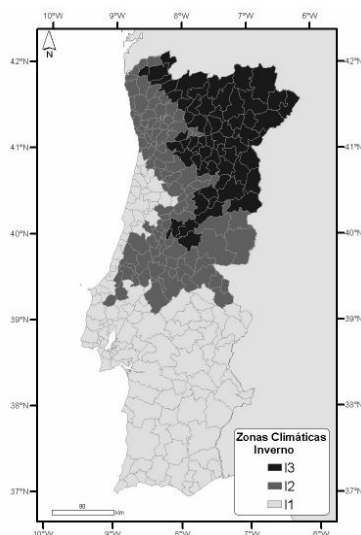


Fig. 5.6 - Divisão de Portugal continental em função das zonas climáticas de Inverno [35]

Normalmente as zonas de ponte térmica são as mais vulneráveis ao nível de resistência térmica sendo por este motivo muitas vezes os pontos onde a exigência não é verificada. De qualquer forma esta imposição tem que ser verificada em toda a extensão da envolvente.

No Regulamento também menciona coeficientes de transmissão térmica de referência que funcionam como um indicativo sobre a qualidade mínima que devem ser acautelados na fase de projecto de forma a respeitar os parâmetros térmicos exigidos para a envolvente dos edifícios.

Quadro 5.3 - Coeficientes de transmissão térmica de referência em W/m<sup>2</sup> °C [35]

| Elemento da envolvente                |                          | Zona climática |                |                |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                       |                          | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | I <sub>3</sub> |
| Elementos exteriores em zona corrente | Zona opacas verticais    | 0,70           | 0,60           | 0,50           |
|                                       | Zonas opacas horizontais | 0,50           | 0,45           | 0,40           |
| Elementos interiores em zona corrente | Zona opacas verticais    | 1,40           | 1,20           | 1,00           |
|                                       | Zonas opacas horizontais | 1,00           | 0,90           | 0,80           |

Ainda no anexo IX contém outra condição que tem que ser verificada, nas zonas de ponte térmica plana, impondo que o valor do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ), calculado de forma unidimensional na direcção normal à envolvente, não pode ultrapassar o dobro do valor do coeficiente de transmissão térmica dos elementos homólogos em zona corrente, respeitando sempre os valores mencionados anteriormente no quadro 5.1.

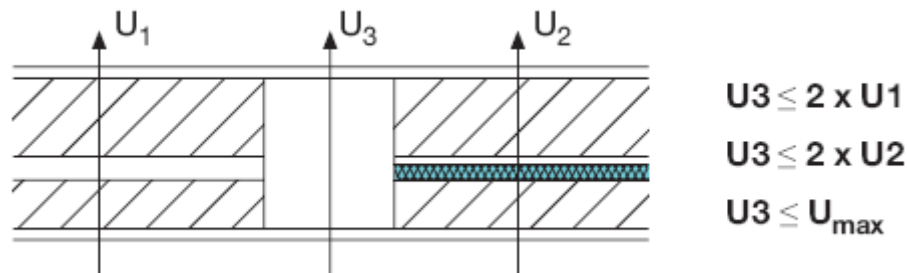


Fig. 5.7 - Requisitos mínimos nas zonas de ponte térmica plana [36]

Ao nível de requisitos energéticos o Regulamento impõem o cálculo das necessidades energéticas de aquecimento ( $N_{ic}$ ), de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) e águas quentes sanitárias ( $N_{ac}$ ). Estes valores terão que ser, respectivamente, inferiores aos correspondentes valores limites de referência para as necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $N_i$ ), para arrefecimento ( $N_v$ ) e para águas quentes sanitárias ( $N_a$ ).

Por fim ainda é necessário calcular a soma ponderada daquelas necessidades, em termos de energia primária e em função das formas de energia utilizada ( $N_{tc}$ ). Este valor, definido como Necessidades Globais de Energia Primária da Fracção Autónoma ( $N_{tc}$ ), deverá ser inferior a um valor máximo ( $N_t$ ) definido por portaria.

As pontes térmicas terão influência no parâmetro das necessidades energéticas de aquecimento uma vez que uma perda substancial do calor no interior do edifício poderá ocorrer nestas zonas caso não sejam tratadas devidamente. As necessidades nominais de aquecimento resultam do valor integrado na estação de aquecimento da soma algébrica de três parcelas:

- Perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios ( $Q_t$ );
- Perdas de calor resultantes da renovação de ar ( $Q_v$ );
- Ganhos de calor úteis ( $Q_{gu}$ ).

$$N_{ic} = \frac{Q_t + Q_v + Q_{gu}}{A_p} \quad (5.12)$$

Relativamente ao parâmetro de perdas de calor por condução é calculado através do recurso da seguinte expressão:

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \quad (5.13)$$

em que:

$Q_t$  – perdas de calor por condução através da envolvente [W];

$Q_{ext}$  – perdas de calor pelos elementos em contacto com o exterior [W];

$Q_{lna}$  – perdas de calor pelos elementos em contacto com locais não aquecidos [W];

$Q_{pe}$  – perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o solo [W];

$Q_{pt}$  – perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício [W].

As perdas nas pontes térmicas planas serão incluídas no factor  $Q_t$  juntamente com os restantes elementos da zona corrente, sendo calculada através da seguinte expressão:

$$Q_{ext} = 0,024 \cdot U \cdot A \cdot GD \quad (5.14)$$

sendo:

$Q_{ext}$  – perdas de calor pelos elementos em contacto exterior durante toda a estação de aquecimento [kWh]

$U$  – coeficiente de transmissão térmica do elemento [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ];

$A$  – área do elemento da envolvente medido pelo interior [ $m^2$ ];

$GD$  – número de graus-dias de aquecimento

As perdas verificadas nas pontes térmicas lineares são tidas em conta no parâmetro  $Q_{pt}$ , respeitando a seguinte expressão:

$$Q_{pt} = 0,024 \cdot L_{pt} \cdot GD \quad (5.15)$$

em que:

$Q_{pt}$  – perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício [W];

$L_{pt}$  – perdas de calor lineares unitárias [W];

$GD$  – número de graus-dias de aquecimento



# 6

## ESTUDO DO CASO

### 6.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta fase do trabalho pretende-se estudar o comportamento a nível térmico de fachadas constituídas por painéis de GRC do tipo sanduíche. A preocupação maior na utilização deste tipo de fachadas recai na zona de união dos painéis uma vez que se trata de uma heterogeneidade induzida ao longo da fachada. Como foi referido anteriormente os painéis sanduíche contêm isolamento térmico entre as duas camadas de GRC que limitam o painel exteriormente. Mas é de apontar que esse isolamento é interrompido nas margens dos painéis e nas zonas de junta. Os limites dos painéis são feitos exclusivamente de GRC, funcionando como nervuras de reforço da peça, e apresentando assim resistência térmica menor que na zona corrente. As zonas de junta, como foi mencionado no capítulo 4, apenas contêm material selante e limitador de junta. Torna-se assim importante estudar o comportamento desta região com elevado cuidado pois estamos perante zonas de ponte térmica que podem trazer consequências indesejáveis à fachada e ao próprio comportamento do edifício.

Com a implementação do novo Regulamento térmico em Portugal (RCCTE) as exigências mínimas a cumprir nas zonas de ponte térmica tornaram-se mais rigorosas, impondo condições mínimas que devem ser respeitadas pelos projectistas. Estes novos requisitos podem inviabilizar a aplicação deste tipo de fachada sem correcção adequada das zonas mais frágeis a nível térmico.

O objectivo nesta fase é observar se existe incumprimento nas fachadas de painéis sanduíche em GRC relativamente aos valores limites indicados no RCCTE. Para tal será feito inicialmente o estudo a um paramento sem qualquer tipo de preocupação de correcção de pontes térmicas de forma a observar se estamos perante problemas de incumprimento. Para isso recorre-se ao caso exemplificativo de uma envolvente que é usualmente utilizado neste tipo de construção. Para a determinação das suas características térmicas serão calculados os coeficientes de transmissão da zona corrente, zona maciça das bordas dos painéis e de junta. Após este cálculo será feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos e as várias imposições contidas no regulamento relativamente às pontes térmicas planas. Caso existam incumprimentos será posteriormente formulado o desenvolvimento de uma equação que permita de forma expedita e rápida o cálculo do reforço necessário nas zonas mais frágeis da fachada. Com este tipo de abordagem pretende-se obter um método inteligível que permita a sua fácil implementação na indústria do GRC.

## 6.2 CÁLCULO TÉRMICO SEM CORRECÇÃO DE PONTE TÉRMICA

Para a análise da possibilidade de problemas nas fachadas de GRC recorre-se a uma envolvente exterior constituída por painéis sanduíches de GRC com acabamento interior de placas de gesso cartonado. As camadas constituintes, em zona corrente, são do exterior para o interior as seguintes:

- 10 mm de GRC;
- 80 mm de EPS (poliestireno expandido moldado);
- 10 mm de GRC;
- 150 mm de caixa-de-ar;
- 10 mm placa de gesso cartonado.

Relativamente às dimensões dos painéis será considerado que têm 3 metros de altura e de largura. A figura 6.1 apresenta um alçado da fachada a analisar:

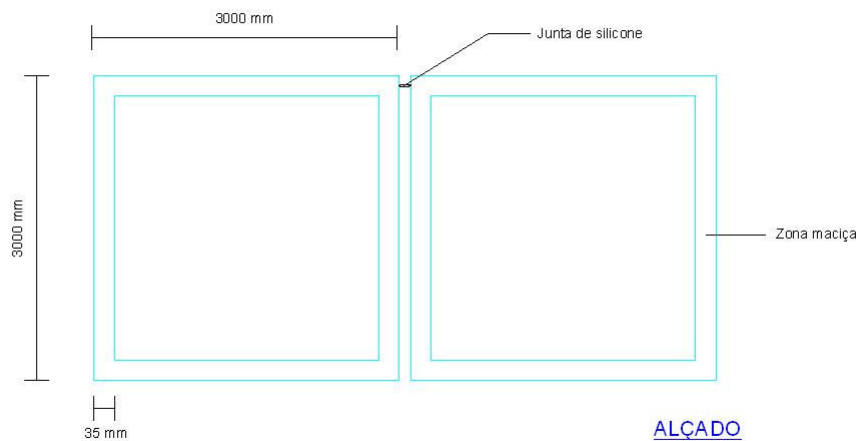


Fig. 6.1 - Alçado da fachada

Na fase seguinte será determinado a constituição e as dimensões da junta a considerar entre painéis, tendo como base a informação sistematizada no capítulo 4.

Relativamente à sua constituição considera-se que será executada em silicone e a sua profundidade será controlada através do recurso a um limitador de junta.

Para o dimensionamento recorre-se às fórmulas 4.1 e 4.2, mencionadas no capítulo 4 do presente trabalho:

$$J = \frac{(100 A)}{X} + B + C \quad (4.1.)$$

$$A = c \times \Delta t \times l \quad (4.2.)$$

Para o cálculo da movimentação devido às variações térmicas (A), considera-se que o painel está sujeita a um ambiente com variação térmica de 30°C. Relativamente ao coeficiente de dilatação térmico do GRC a bibliografia da especialidade [13] indica que o valor varia entre  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  e  $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , desta forma optou-se por considerar a situação mais desfavorável que é o limite superior do intervalo mencionado. Sendo assim a movimentação térmica devido às variações térmicas será:

$$A = 20 \times 10^{-6} \times 30 \times 3000 = 1,8 \text{ mm}$$

Assumindo um selante em silicone com capacidade elástica de movimentação igual a 25% e uma tolerância de montagem de 6mm. Para o cálculo da dimensão mínima da junta não se considerou tolerâncias de nível sísmico.

Desta forma a largura mínima da junta será a seguinte:

$$J = \frac{100 \times 1,8}{25} + 6 + 0 = 13,2 \text{ mm}$$

Optou-se por considerar que a largura entre juntas será de 15mm uma vez que foram as recomendações dadas pela indústria Glasscrete como sendo a dimensão usada para painéis de dimensão 3x3m. Como tinha sido mencionado anteriormente a dimensão da junta não deveria ser menor que 19 mm mas pelos motivos apresentados não se respeitou esse limite.

Relativamente à junta entre painéis é necessário calcular a profundidade do selante e o diâmetro do limitador de junta a utilizar.

Uma vez que se trata de uma junta cuja largura se encontra entre 13 mm e 25 mm a profundidade do selante a aplicar entre os painéis deve ser metade da largura. Desta forma a profundidade a aplicar de selante é de 7,5 mm.

Quanto ao limitador de junta o seu diâmetro deve ser aproximadamente superior a 25% da largura da junta:

$$\theta = 1,25 \times J = 1,25 \times 15 = 18,75 \text{ mm}$$

O diâmetro escolhido para o limitador de junta é de 20 mm porque é o valor comercial existente imediatamente acima do valor de cálculo. O cordão usado para limitador é fabricado em espuma de polietileno extrudido [25].

Desta forma as características dos constituintes existentes na junta será a expressa no corte apresentado pela figura 6.2.

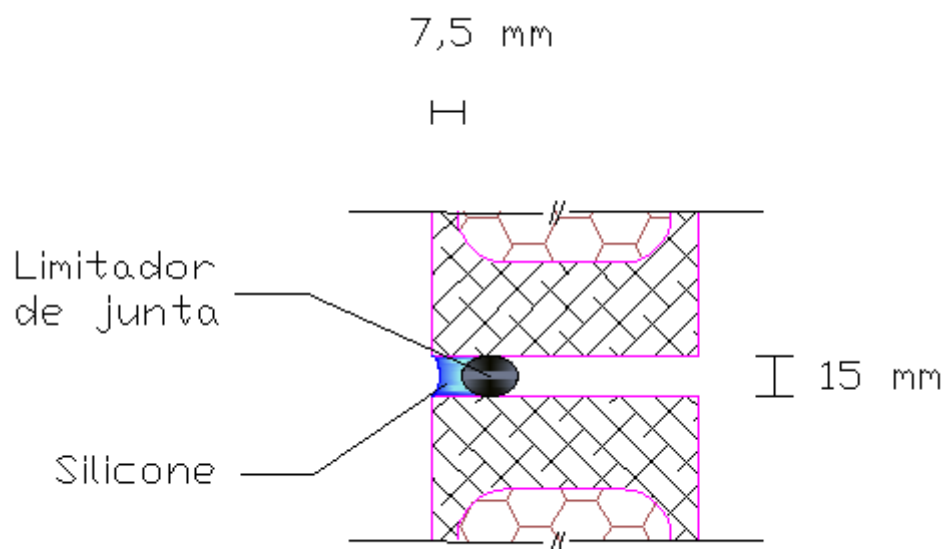


Fig. 6.2 - Detalhe da junta

O corte apresentado a seguir, figura 6.3, representa o painel alvo de análise em zona de junta vertical, e será seguidamente analisado a nível térmico a heterogeneidade existente na fachada.

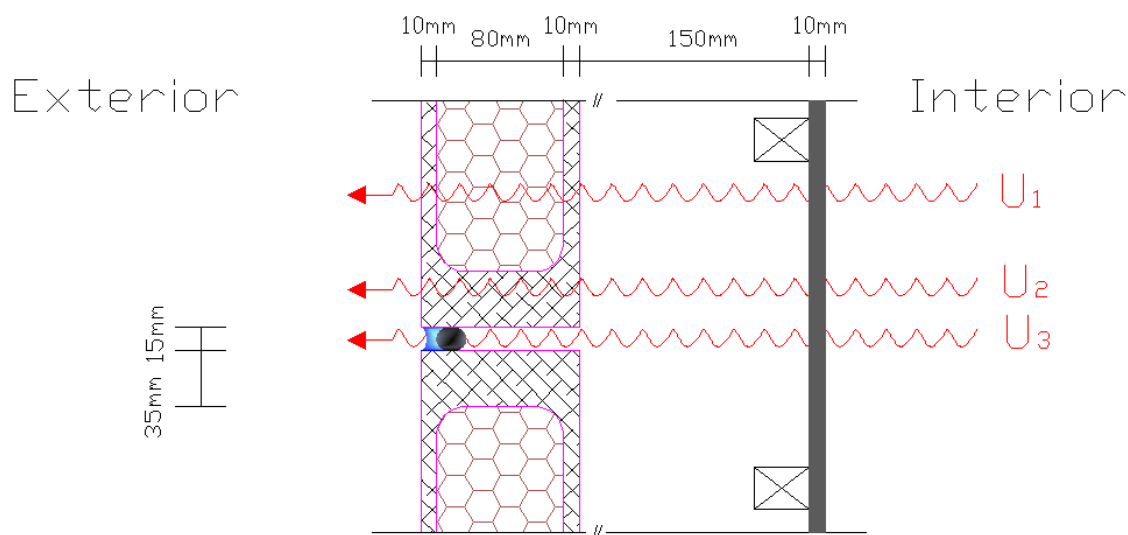


Fig. 6.3 - Corte da fachada em zona de junta vertical

Para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica é necessário recorrer aos valores tabelados pelo LNEC no ITE 50 [38]:

- Placa de gesso cartonado –  $\lambda=0,25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ;
- Caixa-de-ar (entre 25-300mm) –  $R=0,18 \text{ m}^2\text{C/W}$ ;

- Mástique de silicone ( $\rho=1450 \text{ Kg/m}^3$ ) –  $\lambda=0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ;
- Resistência térmica superficial interior –  $R_{si}=0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$ ;
- Resistência térmica superficial exterior –  $R_{se}=0,04 \text{ m}^2\text{C/W}$ ;
- Poliestireno expandido moldado ( $\rho=15\text{-}20 \text{ Kg/m}^3$ ) –  $\lambda=0,04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ;
- Espuma de polietileno extrudido usado no limitador de junta ( $\rho=20\text{-}50 \text{ Kg/m}^3$ ) –  $\lambda=0,05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

Segundo o PCI [1], o valor da condutibilidade térmica do GRC varia entre 0,5 a 1,0 w/m°C. Para o cálculo considera-se o valor médio, ou seja, condutibilidade igual a 0,75 w/m°C.

Sabendo que o valor da resistência de transmissão térmica e o coeficiente de transmissão térmica resulta da aplicação das fórmulas 5.9 e 5.10, os resultados obtidos para as três zonas em estudo são:

Zona corrente ( $U_1$ )

$$R_1 = 0,04 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,75} + \frac{80 \times 10^{-3}}{0,04} + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,75} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 2,417 \text{ m}^2\text{C/W}$$

$$U_1 = \frac{1}{2,417} = 0,414 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Zona maciça ( $U_2$ )

$$R_2 = 0,04 + \frac{100 \times 10^{-3}}{0,75} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 0,523 \text{ m}^2\text{C/W}$$

$$U_2 = \frac{1}{0,523} = 1,912 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Zona junta ( $U_3$ )

$$R_3 = 0,04 + \frac{7,5 \times 10^{-3}}{0,5} + \frac{20 \times 10^{-3}}{0,05} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 0,805 \text{ m}^2\text{C/W}$$

$$U_3 = \frac{1}{0,805} = 1,242 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Nesta fase já podem ser feitas as verificações exigidas pelo Regulamento ao nível de pontes térmicas planas. A primeira verificação baseia-se na comparação dos coeficientes obtidos com os máximos coeficientes de transmissão térmica indicados pelo Regulamento. A segunda verificação consiste na confirmação que o coeficiente de transmissão térmica da zona de junta e maciça não ultrapassa o dobro do coeficiente de transmissão térmica do elemento em zona corrente.

Para a determinação do coeficiente de transmissão máxima o Regulamento impõe limites consoante a zona climática em que a obra se situa. Considera-se que este paramento se encontra na zona climática

$I_3$ , uma vez que é a mais exigente termicamente ao nível da regulamentação, estando desta forma o valor limitado superiormente a  $1,45 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Para a análise se tornar mais coerente e de fácil percepção optou-se por seguir a análise por zonas como foi feito anteriormente.

Zona corrente ( $U_1$ )

$$U_1 = 0,414 \text{ W/m}^2\text{°C} < 1,45 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad \text{OK!}$$

Nesta zona o único requisito que é necessário verificar é se respeita o limite máximo de coeficiente de transmissão. Como se observa não apresenta qualquer tipo de problema existindo ainda uma margem bastante considerável.

O coeficiente de transmissão térmica de referência indicados no Regulamento para a zona em questão e para paramentos verticais exteriores é de  $0,50 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , estando assim o valor obtido abaixo do indicativo sobre a qualidade mínima que deve ser acautelado em fase de projecto.

Zona maciça ( $U_2$ )

$$U_2 = 1,912 \text{ W/m}^2\text{°C} > 1,45 \text{ W/m}^2 \quad \text{KO!}$$

$$U_2 \leq 2 U_1 ; U_2 = 4,62 U_1 \quad \text{KO!}$$

Esta região reprova as duas verificações exigidas sendo desta forma necessário um reforço a nível térmico.

Zona junta ( $U_3$ )

$$U_3 = 1,242 \text{ W/m}^2\text{°C} < 1,45 \text{ W/m}^2 \quad \text{OK!}$$

$$U_3 \leq 2 U_1 ; U_3 = 3 U_1 \quad \text{KO!}$$

A zona de junta apenas reprova a condição que o coeficiente de transmissão térmica da zona em causa não pode ultrapassar o dobro do coeficiente de transmissão térmica do elemento em zona corrente. Tal como na zona maciça vai ser necessário acrescentar material ao longo da sua área de forma a aumentar a resistência térmica.

Na fase seguinte será formulado matematicamente o problema com vista à obtenção de uma equação que permita de forma fácil e rápida calcular o aumento de resistência térmica que é necessário incorporar no sistema para que exista o cumprimento dos requisitos preconizados no RCCTE.

### 6.3 EQUACIONAMENTO DA SOLUÇÃO

O objectivo nesta fase é obter uma metodologia de cálculo que permita determinar a espessura de material isolante a colocar nas áreas de ponte térmica plana de forma a cumprir os coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis pelo RCCTE.

Como se verificou anteriormente, o incumprimento estende-se às áreas maciças dos limites dos painéis e às zonas de junta. Destas duas a primeira é a que apresenta maior coeficiente de transmissão térmico, logo será a partir da zona maciça que será calculado a espessura mínima a colocar de material isolante.

Pretende-se obter uma expressão que se aplique aos diversos tipos de fachadas executadas com painéis sanduíche de GRC, tornando-se indiferente o revestimento interior e exterior aplicado. Desta forma impõe-se que o sistema constituído apenas pelo painel sanduíche, junta e reforço a colocar, deve só por si garantir que os coeficientes de transmissão térmicos das zonas distintas transcrevem os requisitos mínimos para pontes térmicas planas indicados na Regulamentação.

Assim sendo será considerado um painel de configuração sanduíche com as seguintes características:

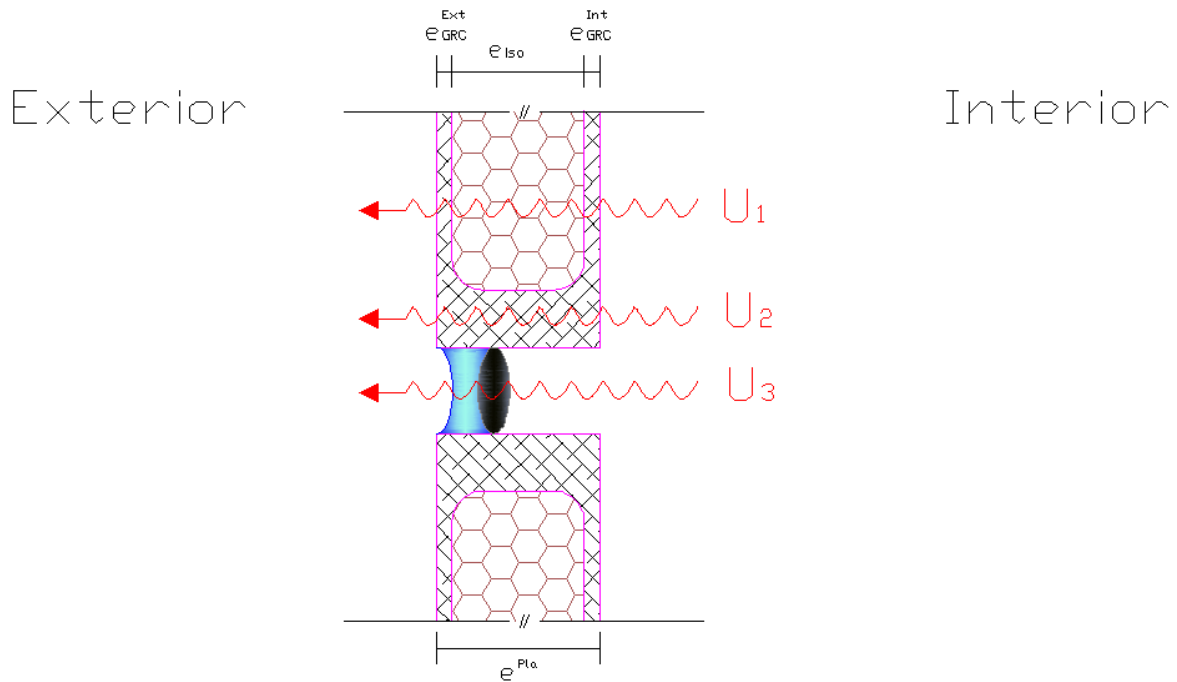


Fig. 6.4 - Painel sanduíche

A resistência térmica em zona corrente ( $R_1$ ) e na zona de junta ( $R_2$ ), são expressas por:

$$R_1 = R_{se} + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + R_{si} \quad (6.1)$$

$$R_2 = R_{se} + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + R_{si} \quad (6.2)$$

em que:

$R_1$  – resistência térmica em zona corrente [(m<sup>2</sup>°C)/W];

$R_{se}$  – resistência térmica superficial exterior [(m<sup>2</sup>°C)/W];

$e_{GRC}^{ext}$  – espessura da camada exterior de GRC [m];

$\lambda_{GRC}$  – condutibilidade térmica do material GRC [W/(m.°C)];

$e_{iso}$  – espessura do isolamento térmico [m];

$\lambda_{iso}$  – condutibilidade térmica do isolante térmico [W/(m.°C)];

$e_{GRC}^{int}$  – espessura da camada interior de GRC [m];

$R_{si}$  – resistência térmica superficial interior [(m<sup>2</sup>°C)/W];

$R_2$  – resistência térmica em zona maciça [(m<sup>2</sup>°C)/W];

$e^{Pla}$  – espessura total do painel de GRC [m].

Como queremos reforçar termicamente a zona mais sensível, zona maciça, tem que existir um aumento ao nível da resistência térmica havendo desta forma um factor de acréscimo que é representado pela parcela  $d/\lambda_d$ . Este factor representa a resistência térmica adicional que o reforço em isolante térmico vai contribuir para o sistema.

Na zona corrente a sua configuração mantém-se não havendo alteração da resistência térmica desta região. Assim a equação da resistência térmica da zona maciça passa a ser caracterizado pela seguinte equação:

$$R_2^C = R_{se} + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + R_{si} + \frac{d}{\lambda_d} \quad (6.3)$$

em que:

$R_2^C$  – resistência térmica em zona maciça após correcção da ponte térmica [(m<sup>2</sup>°C)/W];

$d$  – espessura do reforço [m];

$\lambda_d$  – condutibilidade térmica do material usado para reforço [W/(m.°C)];

O RCCTE impõe no anexo IX que na zonas de ponte térmica plana o valor do coeficiente de transmissão térmica, calculado de forma unidireccional na direcção normal à envolvente, não pode ultrapassar o dobro do coeficiente de transmissão térmica dos elementos homólogos em zona corrente, desta forma torna-se necessário partir da seguinte relação:

$$U_2 = 2 \times U_1 \quad (6.4)$$

Substituindo pelas relações apresentadas anteriormente obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{1}{R_{se} + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + R_{si} + \frac{d}{\lambda_d}} = 2 \times \frac{1}{R_{se} + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + R_{si}} \quad (6.5)$$

Sabendo que  $R_{se}$  é igual a 0,04 e que  $R_{si}$  é 0,13, valores sugeridos pelo LNEC no ITE50, a relação passa a ser a seguinte:

$$0,04 + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + 0,13 = 2 \times \left( 0,04 + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + 0,13 + \frac{d}{\lambda_d} \right) \quad (6.6)$$

Partindo do princípio que a camada exterior e interior de GRC que cobre o material de isolamento tem a mesma espessura ( $e_{GRC}^{int} = e_{GRC}^{ext}$ ):

$$0,17 + \frac{2e_{GRC}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} = 0,08 + \frac{2e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + 0,26 + \frac{2d}{\lambda_d} \quad (6.7)$$

$$\frac{2d}{\lambda_d} = 0,17 + \frac{2e_{GRC}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} - 0,34 - \frac{2e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} \quad (6.8)$$

$$d = \frac{\lambda_d}{2} \times \left( -0,17 + \frac{2e_{GRC} - 2e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.9)$$

Substituindo na equação anterior o factor  $e^{Pla}$  pela seguinte relação:

$$e^{Placa} = 2e_{GRC} + e_{iso} \quad (6.10)$$

Obtemos na equação do cálculo da espessura do material de reforço térmico a seguinte relação:

$$d = \frac{\lambda_d}{2} \times \left( -0,17 + \frac{2e_{GRC} - 2(2e_{GRC} + e_{iso})}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.11)$$

$$d = \frac{\lambda_d}{2} \times \left( -0,17 - \frac{2e_{GRC} + 2e_{iso}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.12)$$

Através desta equação torna-se fácil calcular a espessura de material isolante a colocar de forma a ultrapassar as limitações resultantes da ponte térmica plana ocorrida em zona de junta.

## 6.4 DETALHES CONSTRUTIVOS

Neste momento torna-se oportuno analisar os pormenores de colocação em obra da solução anteriormente preconizada. Convém referir que apenas serão alvo de estudo as situações mais correntes neste tipo de construção. É impossível responder às diversas especificidades de projecto que podem ocorrer em fachadas que utilizem este tipo de sistema construtivo, até porque muitas vezes só através da análise do projecto estrutural em que se insere a fachada é que se consegue determinar os detalhes construtivos necessários para o bom desempenho desta. De qualquer forma através dos desenhos de pormenor fornecidos neste trabalho torna-se mais fácil adaptar às restantes situações. Outra vantagem deste tipo de construção que poderá facilitar o ajuste das soluções determinadas é a forte presença de coordenação dimensional e modular em tecnologias pré-fabricadas que permitirá a padronização dos detalhes construtivos, que além de facilitar a execução e o controlo dos mesmos, permitirá a padronização das soluções e o desenvolvimento de alternativas cada vez melhores para as diversas situações padrão [39].

### 6.4.1 JUNTAS VERTICAIS

Para o tratamento da ponte térmica plana existente em zona de junta vertical serão sugeridos dois tipos possíveis de correcção.

#### 6.4.1.1 Correcção da junta vertical em poliestireno expandido

A primeira solução passa pela aplicação de poliestireno expandido (EPS) na zona de baixa resistência térmica. A figura 6.5 apresenta o detalhe construtivo sugerido para a junta vertical:

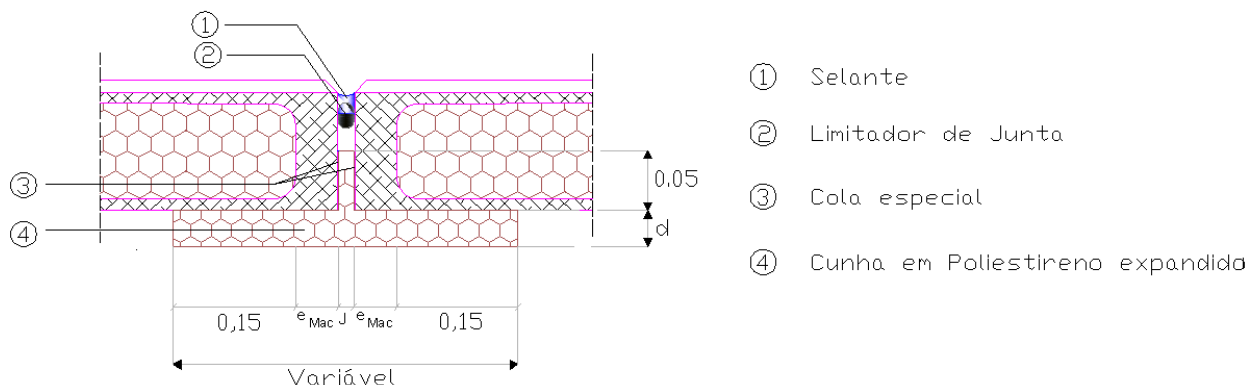


Fig. 6.5 - Disposição construtiva – Correcção da junta vertical em poliestireno expandido

Como se observa pela figura 6.5, optou-se pela colocação de uma cunha em poliestireno expandido na área de junta. A seguir serão explicados minuciosamente os motivos que levaram à escolha de uma solução deste tipo.

O material escolhido para o reforço foi o poliestireno expandido, isto porque é um material que possui baixa condutibilidade térmica, permitindo assim obter níveis de resistência térmica elevada apesar das baixas espessuras de material aplicado. Outra das vantagens do EPS que pesou no processo de selecção foi a sua versatilidade em termos de formas e de tamanhos, que permite que se ajuste à

solução preconizada. Ao contrário de outros isolantes térmicos, torna-se fácil encomendar peças com o formato em cunha e com as dimensões desejadas. Por fim realça-se a sua leveza e o baixo custo relativamente aos outros isolantes.

Em termos de forma à primeira vista pode parecer uma contradição a escolha ter recaído numa configuração em cunha, em que a maior concentração de material se situa na zona de junta, uma vez que se concluiu que é nos limites dos painéis que a resistência térmica é menor. Esta opção deve-se apenas por razões de fixação do reforço aos painéis. Com este tipo de configuração consegue-se através de um procedimento fácil e rápido a injeção de cola nas bordas dos painéis. De apontar que a cola deve ser compatível com o poliestireno expandido e com uma boa elasticidade para garantir a acomodação dos movimentos de expansão e contracção dos painéis. A sua injeção deve ser apenas feita na zona interior de junta, evitando a sua aplicação nas faces paralelas ao painel, como se observa na figura 6.5.

Relativamente às dimensões do reforço, considera-se que o poliestireno deve entrar no plano dos painéis aproximadamente 5 centímetros. Para a obtenção deste valor apenas se teve em conta a espessura usual deste tipo de painel subtraído do espaço ocupado pelo material selante e o limitador de junta. De qualquer forma esse valor pode ser variável, oscilando de acordo com a espessura do painel sanduíche a aplicar. A espessura da cola tem de ser superior ao valor esperado de movimentação do painel. Por exemplo, se tivermos painéis de 3 metros a movimentação aproximada do painel para uma variação térmica de 30°C e considerando coeficiente de dilatação térmica do GRC de  $20 \times 10^{-6}$  mm/mm°C será:

$$A = c \times \Delta t \times l \quad (4.2)$$

$$A = 20 \times 10^{-6} \times 30 \times 3000 = 1,8mm$$

Isto implica que o painel varia 0,9 mm para cada lado, sendo necessário injectar uma espessura de cola superior a 0,9 mm. Obviamente que a dimensão da cunha terá que ser a dimensão da junta subtraída da espessura das duas camadas de cola.

A espessura do reforço que fica na parte exterior dos planos dos painéis, designado por pelo parâmetro  $d$  na figura 6.5, é a resultante da aplicação da fórmula 6.12 que determina a material isolante a colocar de forma a respeitar o RCCTE. Em termos de largura obviamente que a cunha vai ter que cobrir as áreas que não respeitam os limites impostos na regulamentação, sendo ainda acrescido 15 centímetros dos limites da zona maciça em GRC. Estes 15 centímetros permitem maiores garantias a nível térmico uma vez que aumenta o caminho percorrido pelo calor que atravessa o painel e consequentemente um acréscimo da resistência térmica.

#### 6.4.1.2 Correção da junta vertical em poliuretano projectado

A segunda solução que pode ser aplicada para o tratamento da ponte térmica resultante da interrupção do isolamento térmico consiste na projecção de poliuretano na zona de baixa resistência térmica. A figura 6.6 apresenta o detalhe construtivo sugerido:

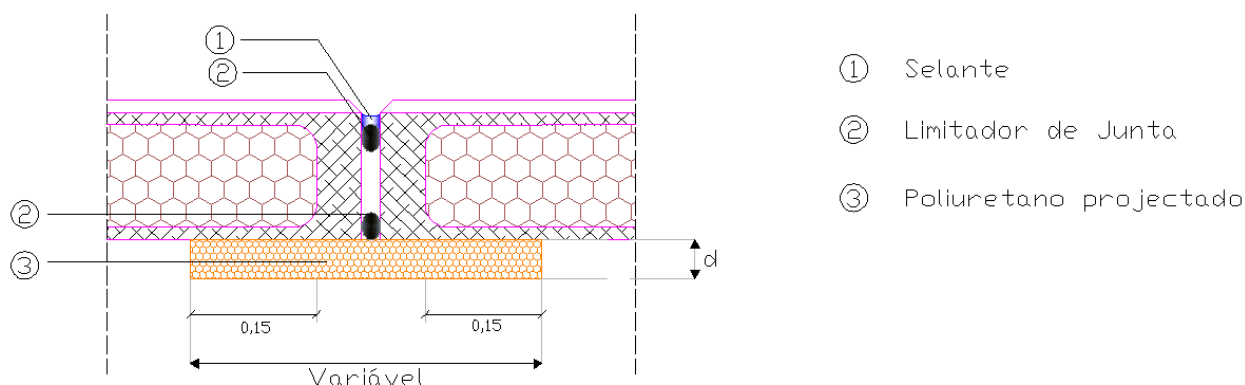


Fig. 6.6 - Disposição Construtiva – Correção da junta vertical em poliuretano projectado

Nesta segunda solução o material escolhido para a correção da ponte térmica foi o poliuretano projectado (PUR). Os motivos principais que levaram a esta escolha foram:

- A baixa condutibilidade térmica deste material, que consegue mesmo superar em cerca de 25% comparativamente à média alcançada pelos isolantes normalmente usados no mercado da construção [40];
- A sua adesão automática à maior parte das superfícies dos elementos construtivos, facilitando assim a sua fixação às zonas alvo de tratamento térmico;
- Facilidade de colocação em áreas onde o acesso é limitado, uma vez que a sua aplicação é feita através de projecção;
- Durabilidade elevada.

Como se repara na figura 6.6, para a correção em poliuretano a espessura de material a projectar é igual ao longo do desenvolvimento do reforço. Essa espessura mais uma vez é calculada recorrendo à fórmula 6.12 desenvolvida neste trabalho. A largura do reforço será a necessária para cobrir as zonas sensíveis a nível térmico, acrescido de 15 centímetros dos limites das zonas maciças pelos motivos referidos na solução anterior.

De notar que no detalhe construtivo é sugerido a colocação de um limitador de junta na parte interior do painel. A sua função é criar uma barreira que evite a entrada de poliuretano na junta. As características deste limitador de junta colocado na parte interior do painel são iguais ao colocado exteriormente.

Os motivos que levaram à sugestão de uma segunda alternativa para a correção da ponte térmica foram:

- Criar um sistema que utilize materiais e princípios de fixação diferentes, trazendo uma alternativa à solução anteriormente aconselhada;
- Vencer possíveis limitações que possam ocorrer em obra na colocação da cunha em EPS, como por exemplo, nos locais em que a estrutura do edifício limita o espaço existente entre si e o painel;
- Permitir que os responsáveis escolham a solução mais económica e que melhor se adapta à situação a corrigir.

#### 6.4.2 JUNTAS HORIZONTAIS

Nas juntas horizontais pode ocorrer ponte térmica plana ou linear, dependendo da localização da junta dos painéis relativamente à estrutura do edifício.

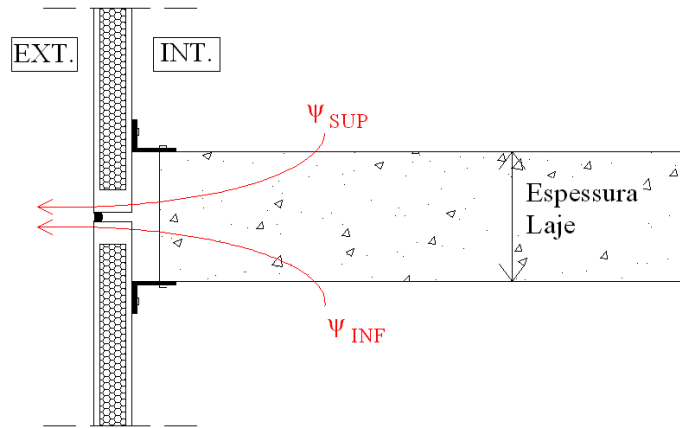


Fig. 6.7 - Junta horizontal no plano da laje – Ponte térmica linear

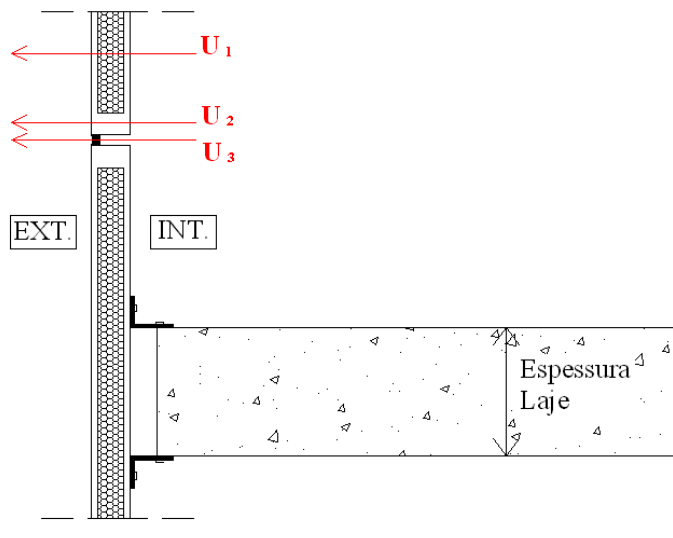


Fig. 6.8 - Junta horizontal no plano da parede – Ponte térmica plana

Em muitos casos o dimensionamento dos painéis é feito com o cuidado de estabelecer uma correspondência entre a sua altura e a distância entre pisos. Esta relação permite facilidades ao nível da fixação dos painéis, havendo um “encaixe” dos painéis na estrutura do edifício. Neste tipo de configuração a zona de junta situa-se na área de ação da laje, ilustrado pela figura 6.7, desta forma à luz do RCCTE estamos perante uma ponte térmica linear. Como foi dito anteriormente no capítulo 5, as perdas térmicas registadas nas pontes térmicas lineares são contabilizadas pelo produto do valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\psi$ ) pelo desenvolvimento linear (comprimento) da ponte térmica, o qual deve ser medido pelo interior. Mas neste tipo de transmissão de calor bidimensional o

regulamento não impõe directamente qualquer limite para os valores de  $\psi$ . Contudo convém relembrar que este tipo de perdas está limitado indirectamente através do parâmetro que exprime as necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $N_{iv}$ ) que tem que ser inferior às necessidades nominais de aquecimento máximas ( $N_i$ ). Por esta razão deve haver uma preocupação no tratamento da ponte térmica linear.

Ao contrário das pontes térmicas planas não é possível obter uma relação da espessura de material isolante a colocar nestas zonas, uma vez que são inúmeras as variáveis que entram no cálculo das necessidades nominais de aquecimento e varia consoante o projecto da obra. Desta forma foi impossível desenvolver um cálculo matemático de correcção das pontes térmicas lineares que garanta o cumprimento do RCCTE. De qualquer forma será indicado o tratamento aconselhado aplicar em regiões com as características mencionadas.

Na fase seguinte será abordado primeiramente a solução a aplicar em juntas horizontais em que a zona de união de painéis fica ao nível da laje de piso, passando posteriormente à solução do caso em que a junta horizontal fica ao nível da área correspondente à zona de parede.

#### 6.4.2.1 Correcção da junta horizontal em caso de ponte térmica linear

A sugestão de correcção neste tipo de situação é preencher o espaço existente entre a laje e o painel com poliuretano projectado, conseguindo assim uma diminuição do coeficiente de transmissão térmica linear na zona de junta.

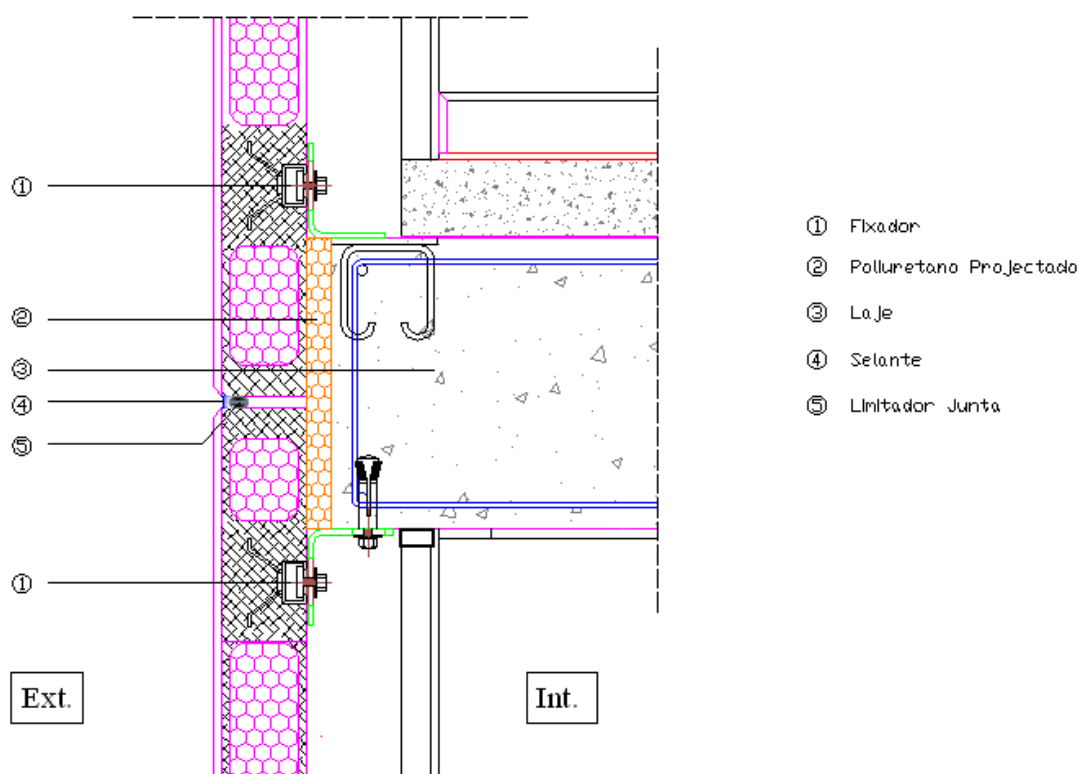


Fig. 6.9 - Disposição construtiva – Correcção da ponte térmica linear resultante da junta horizontal

#### 6.4.2.2 Correção da junta horizontal em caso de ponte térmica plana

Passando agora ao caso em que a junta horizontal se situa na área correspondente à zona de parede, em termos de regulamento terá que respeitar os limites impostos para as pontes térmicas planas. Sendo assim o coeficiente térmico calculado de forma unidireccional na zona maciça não pode ultrapassar o dobro da zona corrente. Nestas situações o cálculo do reforço a colocar será feito recorrendo à fórmula 6.12 e as disposições construtivas são semelhantes às das juntas verticais, a única diferença será que o reforço em material isolante é colocado horizontalmente no decorrer do desenvolvimento da junta. As figuras seguintes mostram as disposições construtivas para a correção das pontes térmicas planas resultantes da junta horizontal:

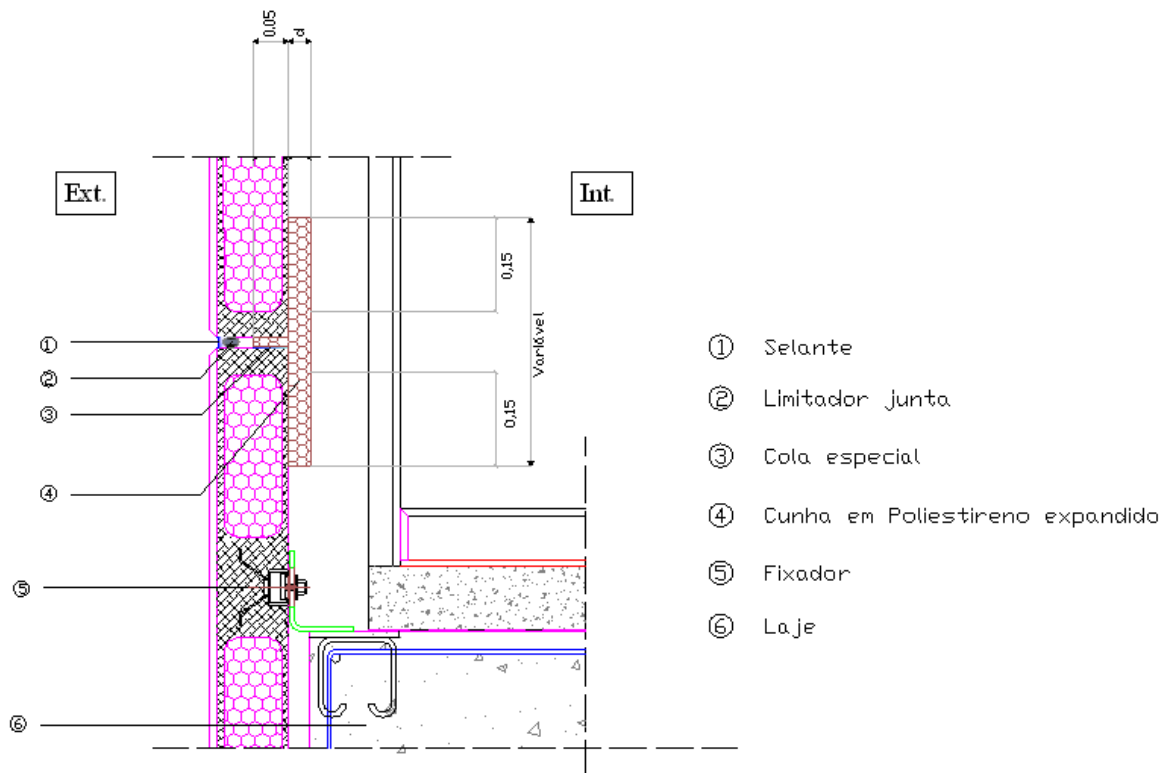


Fig. 6.10 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica plana resultante da junta horizontal em EPS

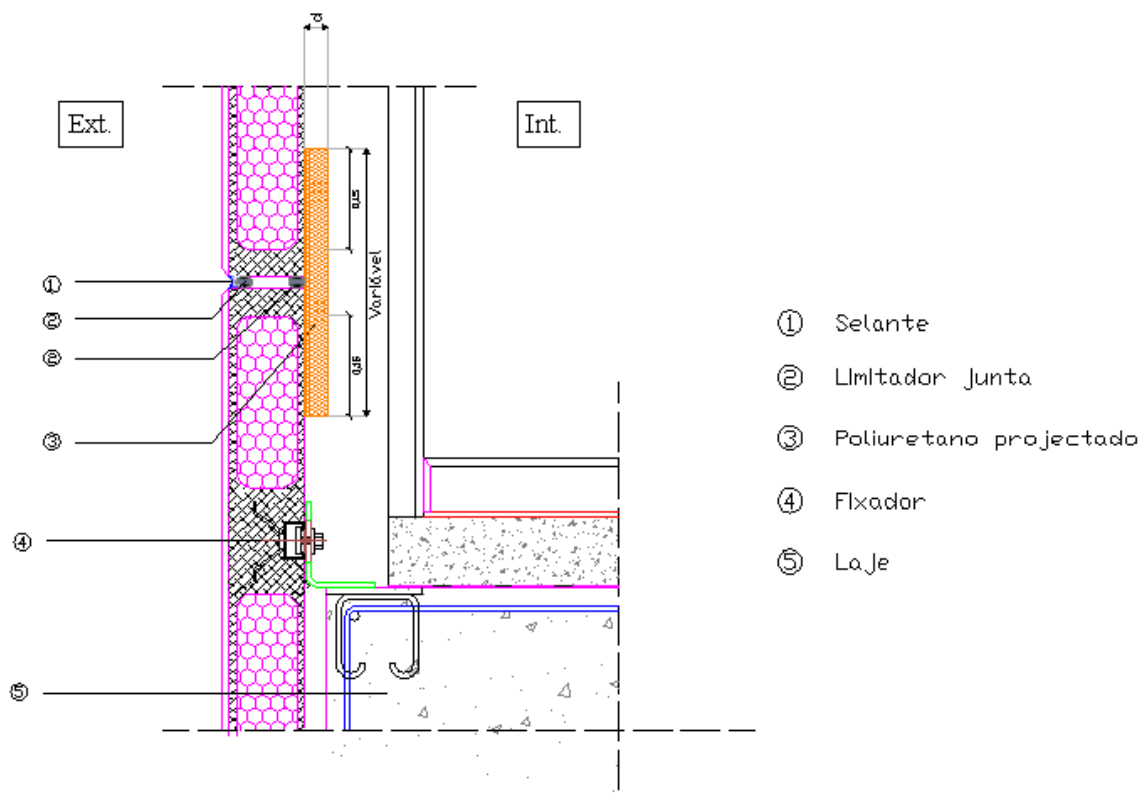


Fig. 6.11 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica plana resultante da junta horizontal em PUR

#### 6.4.3 PILAR DE CANTO

Na zona dos pilares de canto da estrutura também é necessário proceder à colocação de isolamento térmico de forma a corrigir as pontes térmicas. Na maioria das situações o encontro dos painéis é feito como ilustra a figura 6.12, contornando exteriormente a área dos pilares. A solução sugerida para controlar a transmissão de calor nestas áreas passa pela projecção de poliuretano nas faces interiores do pilar. Mais uma vez não é possível calcular com exactidão a espessura que é necessário projectar, mas recomenda-se que a camada seja superior a 3 centímetros. Obviamente que após a projecção de poliuretano será necessário executar o acabamento interior de forma a ocultar o isolamento. A solução pode passar pela fixação de gesso cartonado no contorno do pilar.

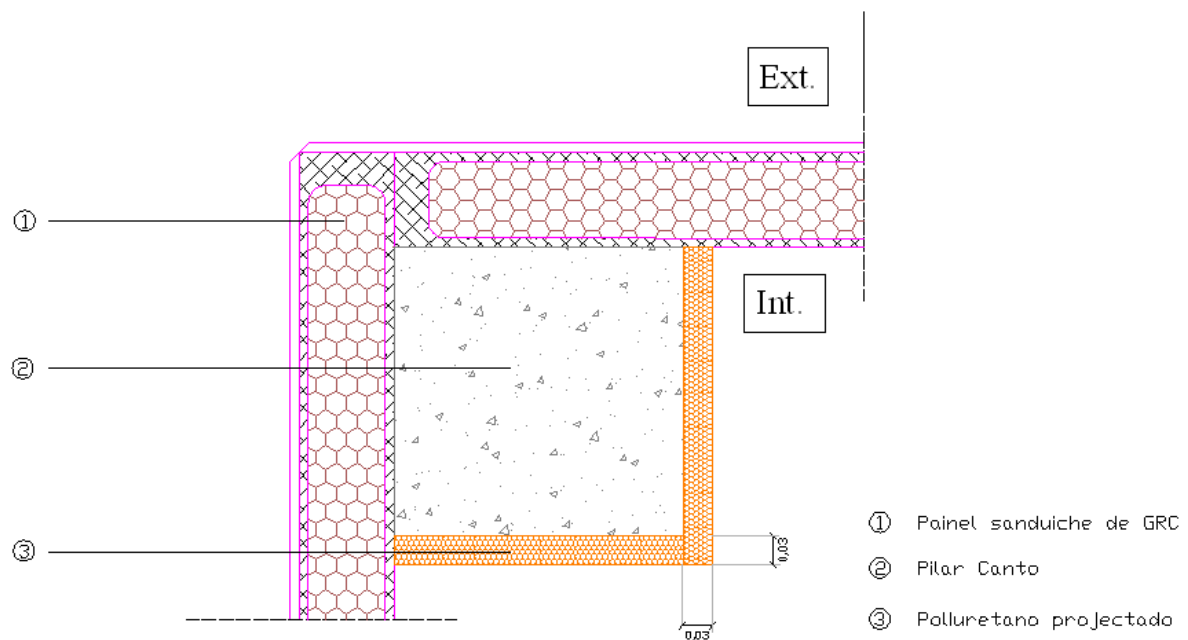


Fig. 6.12 - Disposição construtiva – Correção da ponte térmica nos pilares de canto

## 6.5 VERIFICAÇÃO

Adoptando os princípios sugeridos anteriormente, será feita uma correção da fachada estudada no subcapítulo 6.2. ao nível das pontes térmicas registadas nas zonas de junta entre painéis. O objectivo desta análise é de verificar a fidelidade do modelo proposto para correção das pontes térmicas planas e de sintetizar as inúmeras recomendações ao nível construtivo recorrendo a um exemplo prático. A correção será feita por fases começando pelo tratamento da junta vertical, passando depois para a junta horizontal.

### 6.5.1 JUNTAS VERTICAIS

Na zona de junta vertical é necessário fazer a correção da ponte térmica plana. Para tal é necessário aumentar a resistência térmica da zona maciça dos limites dos painéis e ao longo da área de junta vertical, através da colocação de uma espessura adicional de isolante que será calculado através da fórmula 6.12 desenvolvido anteriormente.

Primeiramente será calculado para a solução que sugere a colocação de uma cunha em poliestireno expandido, assim temos:

$$d = \frac{\lambda_d}{2} \times \left( -0,17 - \frac{2e_{GRC} + 2e_{iso}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.12)$$

Para a fachada em causa temos que:

$$e_{GRC} = 0,01 \text{ m};$$

$$\lambda_{GRC} = 0,75 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)};$$

$$e_{iso} = 0,08 \text{ [m];}$$

$$\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/(m}^\circ\text{C);}$$

A condutibilidade térmica do poliestireno expandido, tendo como base o ITE 50 [38], é de 0,040 W/m°C. Desta forma a espessura mínima a acrescentar na zona mais sensível será:

$$d = \frac{0,040}{2} \times \left( -0,17 - \frac{2 \times 0,01 + 2 \times 0,08}{0,75} + \frac{0,08}{0,04} \right) = 0,032 \text{ m}$$

Como se torna difícil garantir uma precisão às milésimas em placas de poliestireno expandido recomenda-se que este valor seja arredondado em excesso na ordem dos centímetros [41]. Sendo assim será necessário colocar uma espessura mínima de 4 centímetros na zona maciça dos limites dos painéis. Seguindo as disposições construtivas enumeradas anteriormente o desenho em corte na zona de junta vertical será o seguinte:

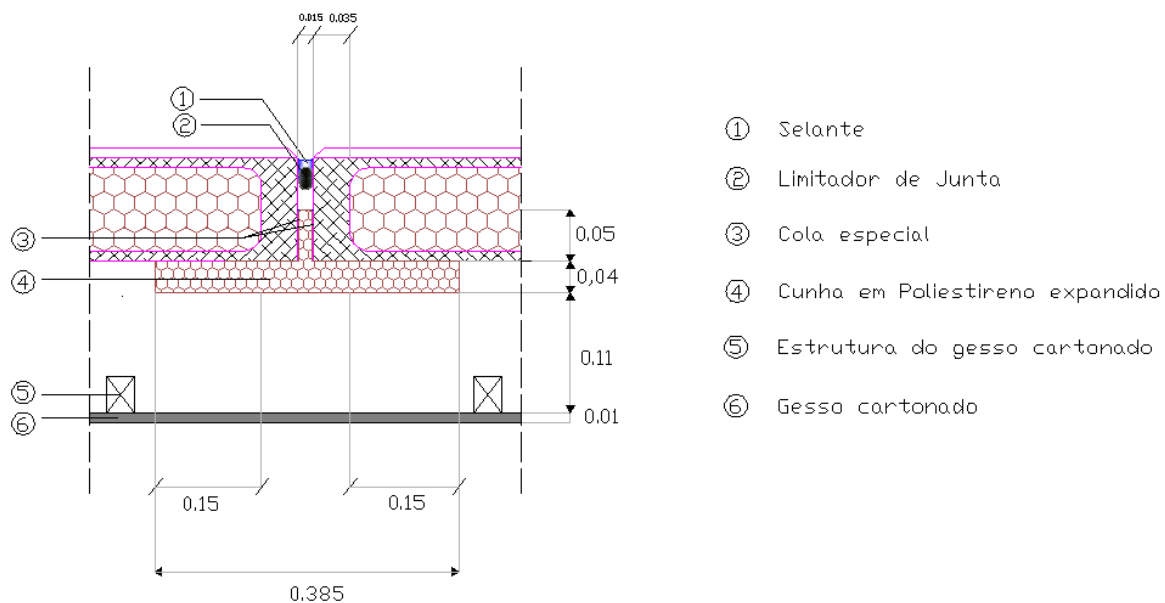


Fig. 6.13 - Disposição construtiva – Correção da junta vertical em poliestireno expandido

Nesta fase já é possível recalcular as alterações a nível térmico que a cunha de EPS provoca no comportamento da fachada e verificar posteriormente se os limites impostos pelo RCCTE para pontes térmicas planas são verificados.

Para esta nova configuração o coeficiente de transmissão térmica da zona corrente mantém-se, havendo apenas alterações nos coeficientes de transmissão térmica nas zonas maciça e de junta.

Zona corrente ( $U_1$ )

$$R_1 = 2,417 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$U_1 = \frac{1}{2,417} = 0,414 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

Zona maciça (U<sub>2</sub>)

$$R_2 = 0,04 + \frac{100 \times 10^{-3}}{0,75} + \frac{40 \times 10^{-3}}{0,04} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 1,523 \text{ m}^2\text{°C / W}$$

$$U_2 = \frac{1}{1,523} = 0,656 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

Zona junta (U<sub>3</sub>)

$$R_3 = 0,04 + \frac{7,5 \times 10^{-3}}{0,5} + \frac{20 \times 10^{-3}}{0,05} + \frac{40 \times 10^{-3} + 50 \times 10^{-3}}{0,04} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 3,055 \text{ m}^2\text{°C / W}$$

$$U_3 = \frac{1}{3,055} = 0,327 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

Os limites que têm que ser verificados para que não ocorra incumprimento do RCCTE são:

- $U_{1,2,3} \leq U_{Máx}$ ;
- $U_{2,3} \leq 2.U_1$ .

O coeficiente de transmissão máximo admissível é imposto pelo RCCTE tendo em conta o elemento da envolvente em causa e a sua zona climática. Considerando, como foi feito anteriormente, que o edifício se situa na zona climática I<sub>3</sub> e que se trata de um elemento vertical exterior o valor máximo admissível terá que ser menor que 1,45 W/m<sup>2</sup>°C.

Zona corrente (U<sub>1</sub>)

$$U_1 = 0,414 \text{ W / m}^2\text{°C} < 1,45 \text{ W / m}^2 \quad \text{OK!}$$

Zona maciça (U<sub>2</sub>)

$$U_2 = 0,656 \text{ W / m}^2\text{°C} < 1,45 \text{ W / m}^2 \quad \text{OK!}$$

$$U_2 \leq 2 U_1 ; U_2 = 1,58 U_1 \quad \text{OK!}$$

Zona junta (U<sub>3</sub>)

$$U_3 = 0,327 \text{ W / m}^2\text{°C} < 1,45 \text{ W / m}^2 \quad \text{OK!}$$

$$U_3 \leq 2 U_1 ; U_3 = 0,79 U_1 \quad \text{OK!}$$

Como se verifica o valor do coeficiente de transmissão térmica destas heterogeneidades, pontes térmicas planas, calculado de forma unidimensional na direcção normal satisfaz as duas condições existentes no RCCTE. De notar que com este tipo de solução, colocação de uma cunha de poliestireno expandido, a zona mais forte termicamente passa a ser a zona de junta. Isto deve-se ao facto de serem colocados 5 centímetros adicionais de EPS no interior da junta para facilitar a sua fixação à estrutura. De qualquer forma esse facto só traz melhorias a nível térmico não tendo qualquer repercussão negativa ao nível de comportamento do edifício e de satisfação do RCTTE.

Para o caso da correcção ser feita com base na colocação de poliuretano nas zonas frágeis, a espessura de material isolante a colocar é calculado através da mesma expressão utilizada no caso do poliuretano expandido, ou seja:

$$d = \frac{\lambda_d}{2} \times \left( -0,17 - \frac{2e_{GRC} + 2e_{iso}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.12)$$

Os parâmetros dos painéis mantêm-se a única alteração que é necessário fazer é referente à condutibilidade térmica do isolante térmico, que passa a ser a indicada para o poliuretano projectado. O valor da condutibilidade térmica do poliuretano projectado considerado neste trabalho é de 0,30 m<sup>2</sup>°C/W com base em catálogos do produto e documentos que estudam este material [40;42;43]. Não se considerou o valor recomendado pelo LNEC através do ITE 50 uma vez que o valor é muito superior ao indicado nos documentos mencionados. Com base nisto a espessura será a seguinte:

$$d = \frac{0,030}{2} \times \left( -0,17 - \frac{2 \times 0,01 + 2 \times 0,08}{0,75} + \frac{0,08}{0,04} \right) = 0,024 \text{ m}$$

Logo a espessura de poliuretano a projectar nas zonas maciças e de junta é aproximadamente 3 centímetros. Assim sendo as disposições construtivas para a zona de junta vertical são as seguintes:

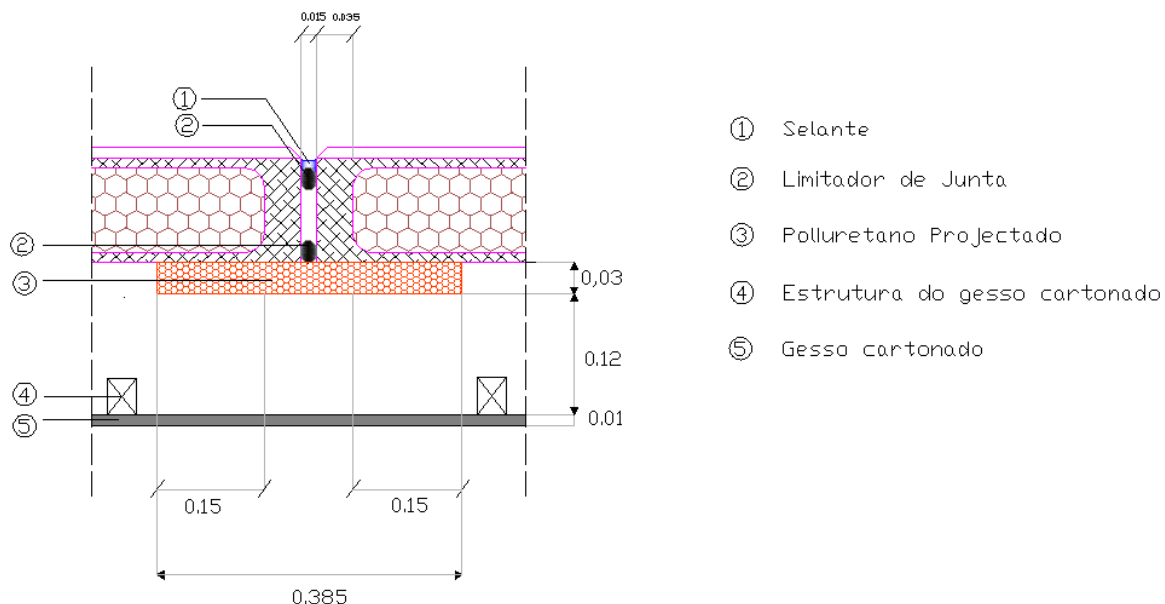


Fig. 6.14 - Disposição construtiva – Correcção da junta vertical em poliuretano projectado

Os coeficientes de transmissão térmica das heterogeneidades existentes no painel são:

Zona corrente ( $U_1$ )

$$R_1 = 2,417 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / W$$

$$U_1 = \frac{1}{2,417} = 0,414 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Zona maciça ( $U_2$ )

$$R_2 = 0,04 + \frac{100 \times 10^{-3}}{0,75} + \frac{30 \times 10^{-3}}{0,03} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 1,523 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / W$$

$$U_2 = \frac{1}{1,523} = 0,656 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Zona junta ( $U_3$ )

$$R_3 = 0,04 + \frac{7,5 \times 10^{-3}}{0,5} + \frac{20 \times 10^{-3}}{0,05} + \frac{30 \times 10^{-3}}{0,03} + \frac{20 \times 10^{-3}}{0,05} + 0,18 + \frac{10 \times 10^{-3}}{0,25} + 0,13 = 2,205 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / W$$

$$U_3 = \frac{1}{2,205} = 0,454 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Os limites que têm que ser verificados para que não ocorra incumprimento do RCCTE são:

- $U_{1,2,3} \leq U_{Máx}$  ;
- $U_{2,3} \leq 2.U_1$ .

Zona corrente ( $U_1$ )

$$U_1 = 0,414 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} < 1,45 \text{ W} / \text{m}^2 \quad OK!$$

Zona maciça ( $U_2$ )

$$U_2 = 0,656 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} < 1,45 \text{ W} / \text{m}^2 \quad OK!$$

$$U_2 \leq 2 U_1 ; U_2 = 1,58 U_1 \quad OK!$$

Zona junta ( $U_3$ )

$$U_3 = 0,454 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} < 1,45 \text{ W} / \text{m}^2 \quad OK!$$

$$U_3 \leq 2 U_1 ; U_3 = 1,1 U_1 \quad OK!$$

Mais uma vez se verifica que o valor do coeficiente de transmissão térmica destas heterogeneidades calculado de forma unidimensional na direcção normal satisfaz as duas condições existentes no RCCTE.

A escolha pela solução mais adequada das apontadas, correcção em EPS ou em PUR, será feita pelo projectista e a indústria responsável pela fabricação e colocação dos painéis de GRC. A selecção deve ter em conta as propriedades específicas de cada uma das soluções e a que melhor se adapta ao projecto do edifício.

#### 6.5.2 JUNTAS HORIZONTAIS

Para a preconização da correcção da ponte térmica resultante da junta horizontal é necessário verificar o posicionamento desta relativamente à estrutura do edifício, determinando assim se estamos perante uma ponte térmica linear ou plana.

Caso a região de junta e maciça fiquem na zona de acção da laje, estamos perante um caso como foi ilustrado pela figura 6.7., sendo necessário controlar a condução bidimensional uma vez que estamos perante uma ponte térmica linear. Tal será feito através da projecção de poliuretano no espaço compreendido entre o painel e a laje, conseguindo assim uma diminuição do coeficiente de transmissão térmico linear. A figura 6.15 mostra as disposições construtivas para este tipo de situação:

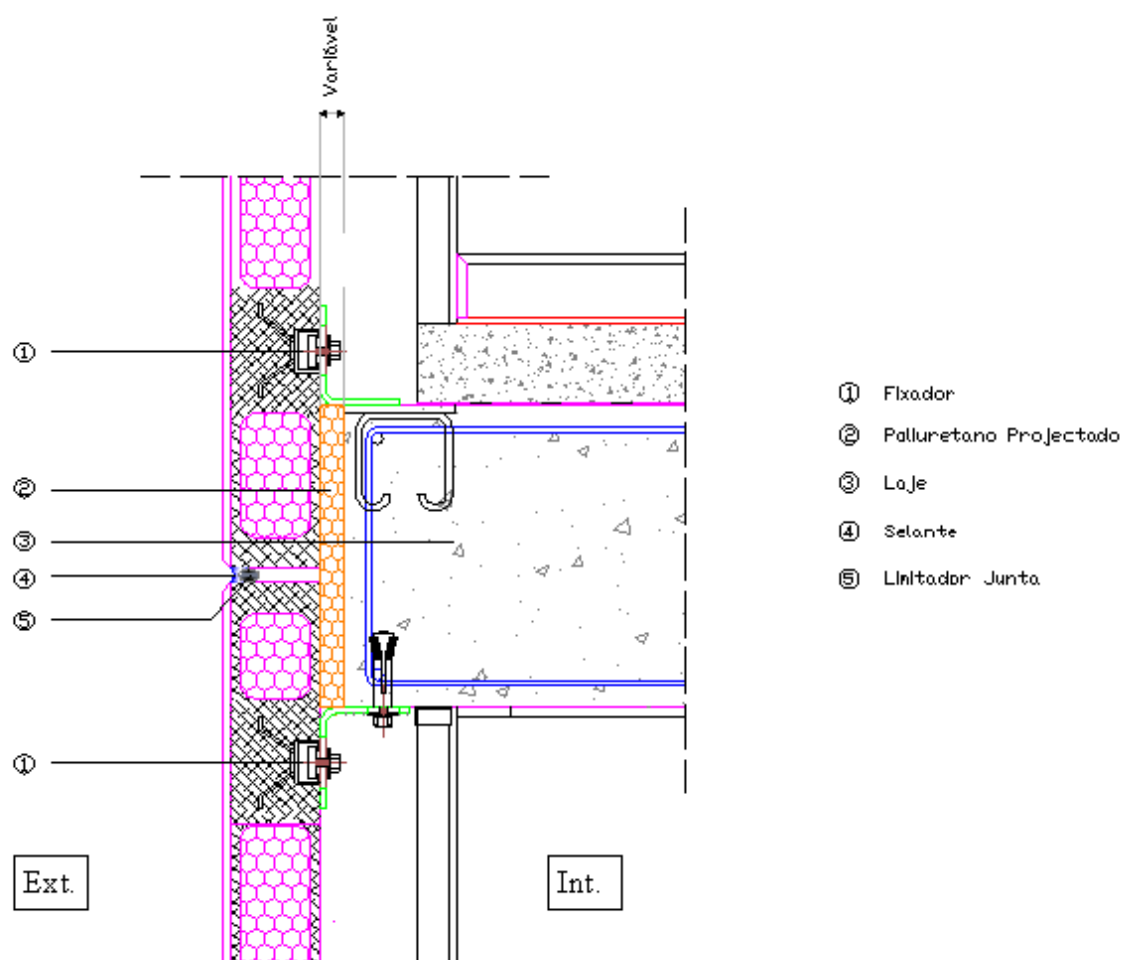


Fig. 6.15 - Disposição construtiva – Correcção da junta horizontal ao nível da laje em poliuretano projectado

Se a junta se localiza à altura da parede, estamos perante uma ponte térmica plana e a correcção a fazer será a mesma que foi preconizado para as juntas verticais. Os coeficientes de transmissão das zonas de junta, maciça e corrente têm valores iguais aos calculados anteriormente sendo desta forma o reforço a colocar nas zonas frágeis da mesma espessura do colocado nas juntas verticais, isto é, 4 cm na solução em poliestireno expandido e 3 cm na correcção em poliuretano projectado.

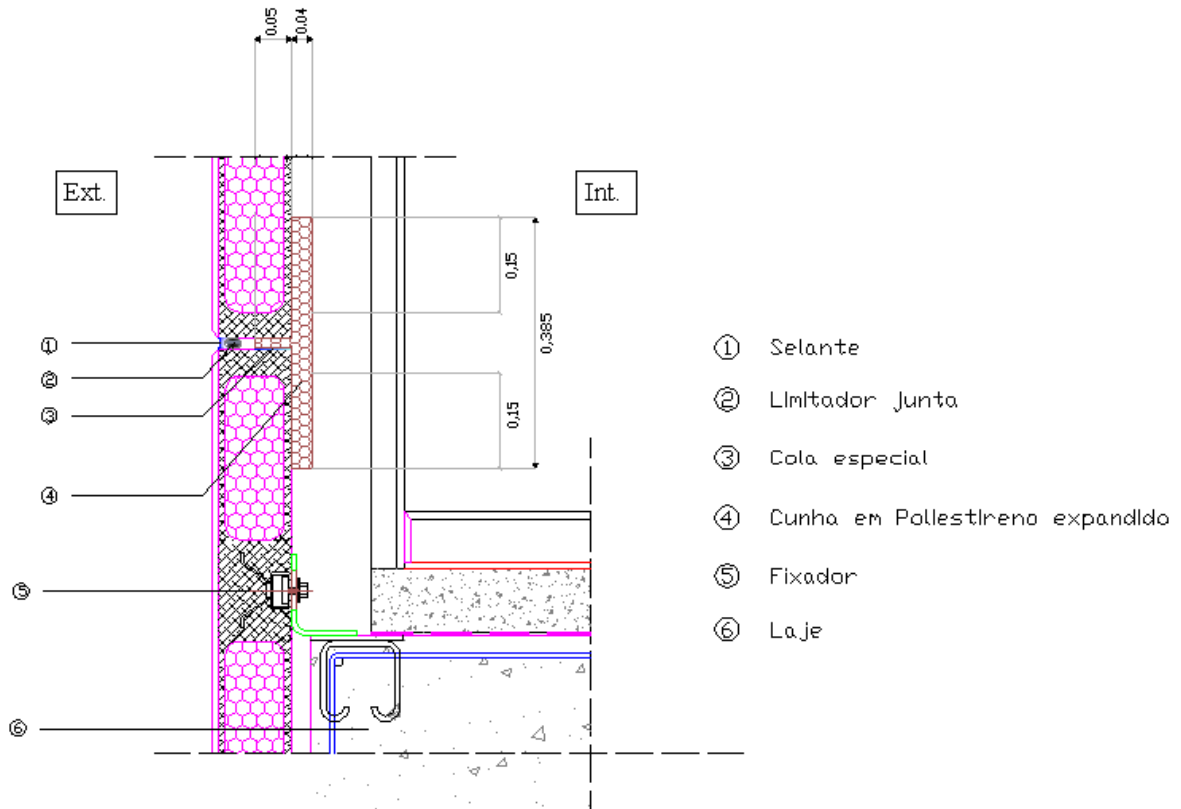


Fig. 6.16 - Disposição construtiva – Correcção da junta horizontal ao nível da parede em poliestireno expandido

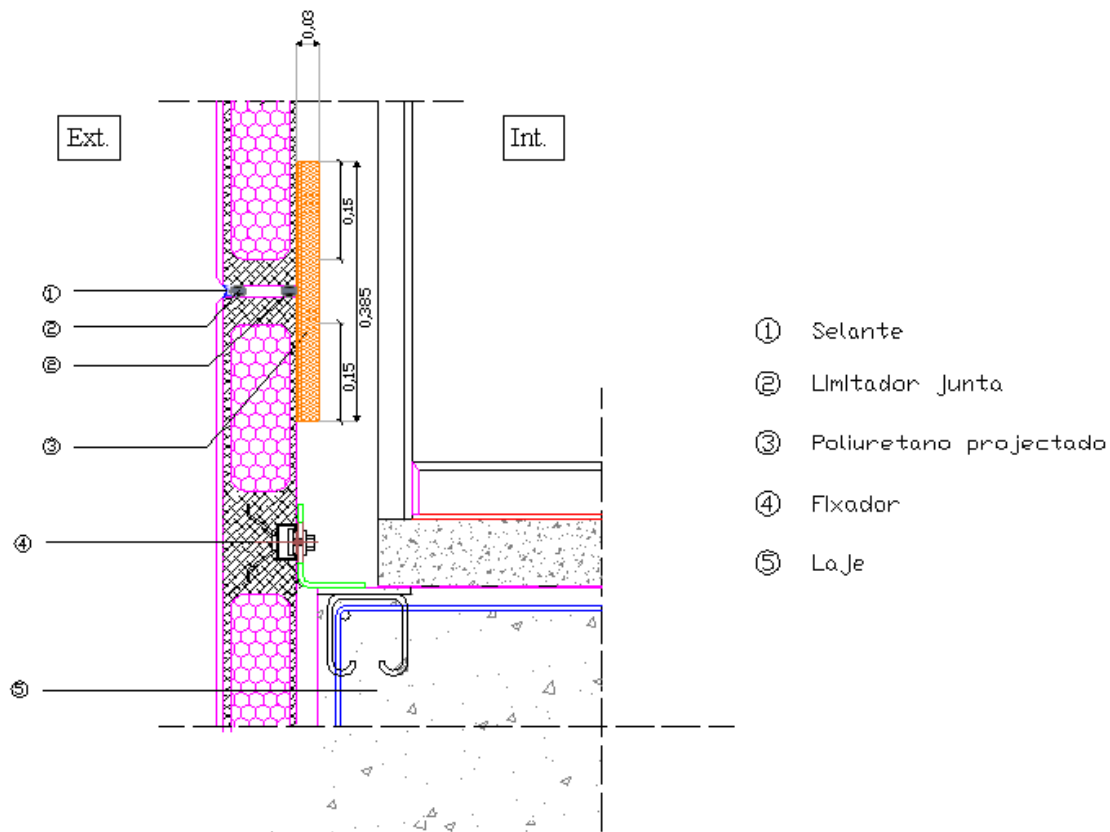


Fig. 6.17 - Disposição construtiva – Correção da junta horizontal ao nível da parede em poliuretano projectado

## 6.6 COMPARAÇÃO SOLUÇÕES

Nesta fase será feita a comparação das características térmicas de três situações distintas: painel de GRC sem isolante na junta, painel de GRC com junta isolada com 4 cm de poliestireno expandido e painel de GRC com junta isolada com 3 cm em poliuretano projectado.

As características calculadas dizem respeito a painéis de 3x3m, constituídos com duas camadas externas de 10 mm de GRC e interiormente por uma placa de poliestireno expandido de 80 mm. A junta entre painéis tem uma largura de 15 mm, constituídas por silicone com 9,5 mm de profundidade e com um limitador de junta de 20 mm de polietileno extrudido.

Os parâmetros indicados têm em consideração as várias heterogeneidades existentes no desenvolvimento da fachada (ver figura 6.18), sendo desta forma calculado inicialmente o coeficiente de transmissão térmica de cada uma das zonas homogêneas e calculando posteriormente o coeficiente de transmissão médio da fachada através da seguinte relação:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6.13)$$

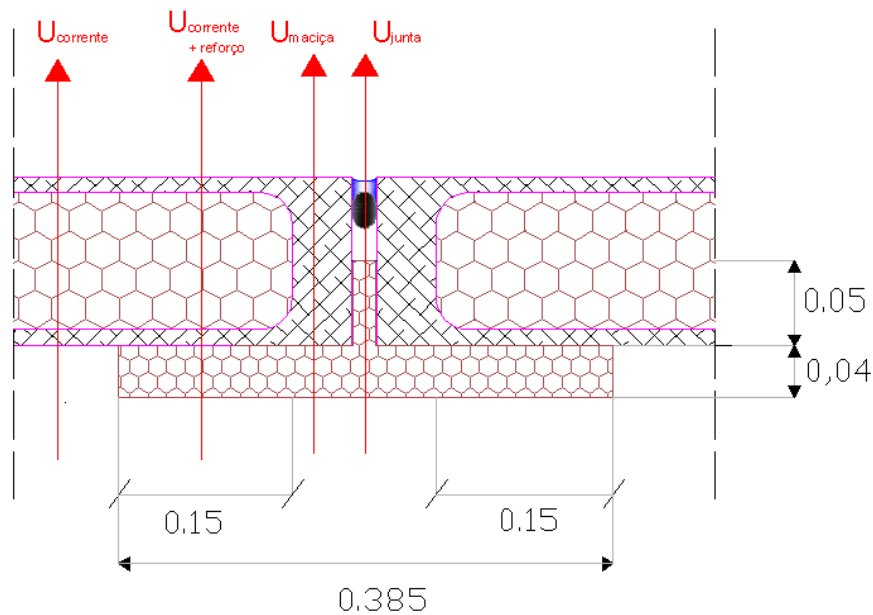


Fig. 6.18 - Definição das zonas expressas na comparação de resultados

Quadro 6.1 - Quadro comparativo dos coeficientes de transmissão térmica [W/m<sup>2</sup>°C]

| Tipo de correcção                          | $U_{\text{corrente}}$ | $U_{\text{corrente+reforço}}$ | $U_{\text{maciça}}$ | $U_{\text{junta}}$ | $U_{\text{médio}}$ |
|--------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Painel GRC sem correcção                   | 0,455                 | —                             | 3,300               | 1,709              | 0,597              |
| Painel GRC com junta isolada em EPS (4 cm) | 0,455                 | 0,313                         | 0,767               | 0,353              | 0,442              |
| Painel GRC com junta isolada em PUR (3 cm) | 0,455                 | 0,313                         | 0,767               | 0,504              | 0,444              |

Da análise dos resultados é possível concluir que o cálculo do coeficiente de transmissão térmico médio assume extrema importância. É exemplo disso, a diferença significativa registada entre o coeficiente de transmissão térmico sem correcção, médio da fachada ( $U_{\text{médio}}$ ) e o corrente ( $U_{\text{corrente}}$ ) em iguais circunstâncias. Esta diferença fixa-se em cerca de 30%.

Nos outros tipos de correcção as diferenças não foram tão significativas uma vez que se procedeu ao reforço das zonas de maior fragilidade térmica. De qualquer forma convém referir que se torna interessante e útil, em fase de projecto, ter em conta o coeficiente de transmissão térmico médio da fachada, uma vez que este permite determinar de forma mais exacta o comportamento térmico da fachada.

Também se torna relevante calcular as diferenças em termos de temperaturas superficiais. Para tal recorre a fórmula 5.8:

$$\theta_{si} = t_i - \frac{U}{h_i}(t_i - t_e) \quad (5.8)$$

Para o cálculo considerou-se que o ar interior apresenta uma temperatura interior de 18°C e uma humidade relativa de 75%. Em termos de ambiente exterior considerou-se uma temperatura de 5°C. Os resultados obtidos para estas condições são os seguintes:

Quadro 6.2 - Quadro comparativo das temperaturas superficiais interiores [°C]

| Tipo de correcção                          | tsi <sub>corrente</sub> | tsi <sub>corrente+reforço</sub> | tsi <sub>maciça</sub>  | Tsi <sub>junta</sub> |
|--------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------|
| Painel GRC sem correcção                   | 17,23                   | —                               | 12,42<br>(condensação) | 15,11                |
| Painel GRC com junta isolada em EPS (4 cm) | 17,23                   | 17,47                           | 16,70                  | 17,40                |
| Painel GRC com junta isolada em PUR (3 cm) | 17,23                   | 17,47                           | 16,70                  | 17,15                |

No caso da fachada executada sem correcção térmica da junta verificou-se heterogeneidades acentuadas ao longo do seu desenvolvimento, registando-se mesmo condensações na área maciça situada na periferia dos painéis. O diferencial máximo aferido situa-se nos 4,8°C em virtude das condições de ambiente consideradas. Como foi mencionado no capítulo 5 tal situação é indesejável uma vez que poderá ter diversas implicações negativas no desempenho da fachada.

Nas situações em que foi feita a correcção da junta verificou-se uma melhoria acentuada, havendo uma maior homogeneidade de temperaturas superficiais nas diversas zonas da fachada. As duas soluções apresentam comportamento muito semelhante, residindo a única diferença na maior temperatura superficial verificada na zona de junta tratada com poliestireno expandido. Uma vez que foi introduzido mais isolamento térmico na zona de junta de forma a facilitar a fixação do reforço ao painel, materializado numa cunha de poliestireno expandido, que contribui para a diferença registada na comparação destas duas soluções.

No quadro 6.1 são sintetizadas as propriedades de cada um dos materiais usados nas soluções preconizadas para a correcção da ponte térmica plana:

Quadro 6.3 - Propriedades específicas, para 5 cm, de materiais de isolamento [42;43]

| Isolante<br>Espessura=5 cm      | Condutibilidade<br>térmica ( $\lambda$ )<br>[W/m°C] | Peso<br>Específico<br>[Kg/m <sup>2</sup> ] | Energia<br>incorporada<br>[Kwh/m <sup>2</sup> ] | Custo<br>económico<br>[€/m <sup>2</sup> ] | Forma de<br>aplicação |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| Poliestireno<br>Expandido (EPS) | 0,04                                                | 1,3                                        | 140                                             | 5,50                                      | Colagem               |
| Espuma de<br>poliuretano (PUR)  | 0,03                                                | 1,8                                        | 123                                             | 5,50                                      | Projecção             |

Confrontando as duas soluções apresentadas verifica-se que o reforço com espuma de poliuretano projectado poderá ser à primeira vista economicamente mais vantajosa, uma vez que para alcançar a mesma eficácia a nível térmico será necessário colocar menor espessura de material. Contudo, convém notar que dadas as suas especificidade de aplicação, mão-de-obra e equipamento especial, poderá resultar numa situação de benefício/custo não suficientemente elevado.

## 6.7 NÍVEIS DE QUALIDADE

O método desenvolvido anteriormente para o dimensionamento da espessura mínima de isolamento térmico a colocar nas zonas sensíveis apenas têm em conta o cumprimento do RCCTE. Deste modo optou-se por complementar a metodologia de forma a responder a diversos níveis de qualidade para responder eficazmente às diversas exigências do mercado. Os níveis de qualidade são divididos em três categorias denominadas de mínimo, médio e máximo.

O nível mínimo corresponde ao apresentado anteriormente, ou seja, o reforço a colocar tem que permitir que as zonas maciça e de junta não ultrapassem o dobro do coeficiente de transmissão térmica da zona corrente, condição de qualidade mínima indicada no RCCTE.

No nível médio o critério optado foi que nas zonas mais frágeis o coeficiente de transmissão térmica não ultrapasse em 50 % o da zona corrente. Com esta exigência evitamos que as perdas de calor sejam inferiores e consequentemente que os gastos de energia sejam reduzidos. Ao mesmo tempo diminuímos o risco de condensações superficiais interiores e consequente formação de bolores e fungos nos revestimentos interiores.

O nível máximo corresponde à “eliminação” da ponte térmica plana, ou seja, o coeficiente de transmissão das zonas maciça e de junta é aproximadamente igual ao da zona corrente. As vantagens de optar por este nível são obter ganhos ao nível de perdas de calor, diminuição dos riscos de condensações, obtenção de uma “homogeneização” das temperaturas superficiais e evitar formação de fungos e bolores.

### 6.7.1 NÍVEL MÉDIO

Para a formulação da análise matemática vamos partir do princípio que na zona mais sensível a nível térmico, a zona maciça, o coeficiente de transmissão térmica supera em 50 % o da zona corrente.

Desta forma obtemos a seguinte relação:

$$U_2 = 1,5 \times U_1 \quad (6.14)$$

$$\frac{1}{R_{se} + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + R_{si} + \frac{d_{med}}{\lambda_d}} = 1,5 \times \frac{1}{R_{se} + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + R_{si}} \quad (6.15)$$

Sabendo que  $R_{se}$  é igual a 0,04 e que  $R_{si}$  é 0,13

$$0,04 + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + 0,13 = 1,5 \times \left( 0,04 + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + 0,13 + \frac{d_{med}}{\lambda_d} \right) \quad (6.16)$$

Partindo do princípio que a camada exterior e interior de GRC que cobre o material de isolamento tem a mesma espessura:

$$0,17 + \frac{2e_{GRC}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} = 0,255 + \frac{1,5e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + \frac{1,5d_{méd}}{\lambda_d} \quad (6.17)$$

$$d_{méd} = \frac{\lambda_d}{1,5} \times \left( -0,085 + \frac{2e_{GRC} - 1,5e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.18)$$

Substituindo na equação anterior o factor  $e^{Pla}$  pela seguinte relação:

$$e^{Pla} = 2e_{GRC} + e_{iso} \quad (6.10)$$

Obtemos na equação do cálculo da espessura do material de reforço térmico a seguinte relação:

$$d_{méd} = \frac{\lambda_d}{1,5} \times \left( -0,085 + \frac{2e_{GRC} - 1,5(2e_{GRC} + e_{iso})}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.19)$$

$$d_{méd} = \frac{2}{3} \times \lambda_d \times \left( -0,085 - \frac{e_{GRC} + 1,5e_{iso}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.20)$$

#### 6.7.2 NÍVEL MÁXIMO

Como foi referido anteriormente o nível de qualidade máxima resulta da anulação da ponte térmica plana quer na zona de junta como na área maciça de GRC. Para tal, é necessário igualar o coeficiente de transmissão da região mais frágil ao da zona corrente. Com esta correcção o comportamento térmico da fachada é aproximadamente constante ao longo de toda a sua extensão.

Partindo da igualdade entre os coeficientes de transmissão térmica:

$$U_2 = U_1 \quad (6.21)$$

$$\frac{1}{R_{se} + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + R_{si} + \frac{d_{máx}}{\lambda_d}} = \frac{1}{R_{se} + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + R_{si}} \quad (6.22)$$

Considerando  $R_{se}$  igual a 0,04 e  $R_{si}$  igual a 0,13

$$0,04 + \frac{e_{GRC}^{ext}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{e_{GRC}^{int}}{\lambda_{GRC}} + 0,13 = 0,04 + \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + 0,13 + \frac{d_{máx}}{\lambda_d} \quad (6.23)$$

Partindo do princípio que a camada exterior e interior de GRC que cobre o material de isolamento tem a mesma espessura:

$$\frac{2e_{GRC}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} = \frac{e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + \frac{d_{máx}}{\lambda_d} \quad (6.24)$$

$$d_{méd} = \lambda_d \times \left( \frac{2e_{GRC} - e^{Pla}}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.25)$$

Substituindo na equação anterior o factor  $e^{Pla}$  pela seguinte relação:

$$e^{Pla} = 2e_{GRC} + e_{iso} \quad (6.10)$$

Obtemos na equação do cálculo da espessura do material de reforço térmico a seguinte relação:

$$d_{máx} = \lambda_d \times \left( \frac{2e_{GRC} - (2e_{GRC} + e_{iso})}{\lambda_{GRC}} + \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} \right) \quad (6.26)$$

$$d_{máx} = \lambda_d \times \left( \frac{e_{iso}}{\lambda_{iso}} - \frac{e_{iso}}{\lambda_{GRC}} \right) \quad (6.27)$$



# 7

## CONCLUSÕES

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho incidiu na análise do comportamento térmico de fachadas executadas com painéis sanduíche de GRC, tendo o cuidado de estudar pormenorizadamente as consequências da interrupção do isolamento térmico nas zonas periféricas e de junta.

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a inexistência de estudos que abordassem as fachadas pré-fabricadas como paramentos heterogéneos e que quantificassem o decréscimo que as zonas mais frágeis repercutem no comportamento térmico dos edifícios.

O objectivo principal foi verificar se a prática corrente na execução de fachadas com este tipo de sistema construtivo cumpre os requisitos mínimos impostos no novo Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril de 2006).

Para a clara percepção do problema, o desenvolvimento deste trabalho exigiu inicialmente uma recolha teórica que incidiu principalmente nos seguintes temas:

- Caracterização do compósito GRC;
- Configuração das fachadas executadas em painéis sanduíche de GRC;
- Práticas e normas referente à execução de juntas em painéis pré-fabricados;
- Análise do RCCTE com o objectivo de sintetizar as qualidades exigidas para pontes térmicas.

O estudo mais aprofundada incidiu na análise térmica dos painéis sanduíche e no desenvolvimento de um modelo matemática que permita o cálculo da espessura de material isolante a colocar nas zonas de ponte térmica de forma a cumprir as exigências indicadas no RCCTE. Esse modelo matemático foi posteriormente adaptado a níveis de qualidade superiores, respondendo desta formas a diversos graus de exigência.

As principais dificuldades encontradas no decorrer deste trabalho residiram nos seguintes aspectos:

- Obtenção de um modelo matemático e soluções construtivas que fossem facilmente posta em prática na indústria da construção;
- Adaptabilidade das soluções às diversas especificidades de projecto;

Considera-se que os objectivos fundamentais foram atingidos e espera-se que este trabalho possa contribuir para o melhoramento do desempenho térmico de fachadas sanduíche em GRC e principalmente despertar o sector para os problemas inerentes a este tipo de sistema.

## 7.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A conclusão principal deste trabalho é que fachadas executadas com painéis sanduíche de GRC apresentam graves problemas ao nível de pontes térmicas, pondo em causa a sua aplicação sem uma correcção adequada das zonas termicamente mais frágeis.

Verificou-se que a zona de menor resistência térmica corresponde à área limite dos painéis, constituída exclusivamente por GRC, seguida da região de junta. Através do cálculo dos parâmetros térmicos observou-se de uma forma aproximada que o coeficiente de transmissão térmica na zona maciça e de junta é, respectivamente, cinco e três vezes maior ao da zona corrente. Tal facto desrespeita as exigências indicadas no RCCTE, uma vez que menciona que nenhuma zona de qualquer elemento opaco da envolvente, incluindo zonas de ponte térmica plana, pode ter valores de coeficientes de transmissão térmica, calculado de forma unidireccional na direcção normal à envolvente, superior ao dobro do dos elementos homólogos em zona corrente.

Pelo motivo apresentado anteriormente foram preconizadas soluções para as juntas verticais e horizontais existentes entre painéis.

### 7.2.1 JUNTAS VERTICAIS

Para a correcção da ponte térmica plana existe na zona de junta vertical preconiza-se duas soluções possíveis.

A primeira passa pela aplicação de uma cunha em poliestireno expandido (EPS) na zona maciça e de junta. A espessura de material a colocar é calculado através do recurso da equação desenvolvida neste trabalho, fórmula 6.12, e a fixação é feita através de uma cola compatível com o material isolante.

A segunda solução possível é a projecção de poliuretano nas zonas de ponte térmica plana, sendo mais uma vez calculada a espessura através da fórmula 6.12 desenvolvida no capítulo 5.

A escolha pela solução mais adequada depende de vários factores, sendo difícil indicar a mais vantajosa. Por um lado a solução em poliuretano necessita de menor espessuras para atingir a mesmo desempenho térmico que o poliestireno expandido, mas o equipamento necessário para a sua aplicação é mais exigente uma vez que necessita de uma pistola de projecção especialmente concebida para a sua aplicação. Por estes motivos optou-se por referir as duas soluções deixando ao critério do projectista a escolha pela que melhor se adapta ao projecto em causa.

### 7.2.2 JUNTAS HORIZONTAIS

Para a zona de junta horizontal a solução depende da localização das zonas frágeis relativamente à estrutura do edifício.

No caso da junta estar ao nível da laje, prática muito comum neste tipo de fachadas uma vez que facilita a fixação dos painéis à estrutura, estamos perante uma ponte térmica linear. O regulamento nestes casos não impõe um limite rígido, não sendo assim possível definir com exactidão a espessura de material isolante a colocar. De qualquer forma sugere-se o preenchimento do espaço compreendido entre a laje e o painel com poliuretano projectado, controlando assim o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica.

No caso da junta estar ao nível da parede o tratamento preconizado é igual ao da junta vertical, isto porque estamos perante uma ponte térmica plana.

### **7.3 PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO**

As pontes térmicas constituem uma das causas primordiais das patologias observadas nos edifícios. O presente trabalho dá uma contribuição para o melhoramento do desempenho em edifícios executados com painéis pré-fabricados, embora convenha salientar que existe um vasto campo de investigação neste domínio.

Assim o trabalho motiva perspectivas de desenvolvimento, tais como:

- Simular laboratorialmente o comportamento das correcções sugeridas;
- Analisar o efeito da existência de juntas no desempenho acústico de fachadas com painéis sanduíche;
- Avaliar as condições de segurança das juntas e das soluções preconizadas neste trabalho em situações de incêndio;



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Precast/Prestressed Concrete Institute – PCI. *Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concret Panels*. Precast/Prestressed Concrete Institute, USA, 1993.
- [2] Majumdar, A., Laws, V. *Glass Fibre Reinforced Cement*, BSP Professional Books, Oxford, 1991.
- [3] <http://www.stonewear.com/tech/history.htm>. 04/12/2007.
- [4] <http://www.grca.org.uk>. 14/11/2007.
- [5] <http://www.pci.org> 14/11/2007.
- [6] Ferreira, J., Branco, F. *Aplicação Estrutural do Betão Reforçado com Fibras de Vidro (GRC)*. Seminário de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa– IST, 2004.
- [7] <http://www.glasscrete.pt>. 18/11/2007.
- [8] Nippon Electric Glass. *Application of NEG ARG Fibre*. Nippon Electric Glass Co., 2000.
- [9] Glassfibre Reinforced Concrete Association – GRCA. *GRC in action: Today's GRC for architects and engineers*. Glassfibre Reinforced Concrete Association, UK, 2003.
- [10] Olivares, F. *Materiales de Última Generation y Materiales Eficientes*, Universidade Alcalá – UAH, Madrid, 2007.
- [11] <http://www.lbie.com>. 2/11/2007.
- [12] Peruzzi, A. *Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificado com Látex e adição de Sílica Ativa*. Dissertação de Mestrado. USP, 2002.
- [13] Cem-FIL International Limited. *Cem-FIL GRC Technical Data*. Vetrotex.
- [14] Silva, M., John, V. *Paineis em Cimento Reforçado com Fibras de Vidro (GRC)*, USP, São Paulo, 1998
- [15] *Sistema DRACE para Cerramiento de Fachadas com Paneles Prefabricados de GRC*, Instituto Eduardo Torroja, Madrid.
- [16] Santiago, M. *Hormigones Reforzados com Fibras*, Departamento de Construcciones Arquitectónicas da Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [17] <http://www.power-sprays.co.uk>. 04/12/2007.
- [18] Silva, V. *Directrizes para o Projecto de Painéis de Fachada em Cimento Reforçado com Fibras de Vidro*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 1998.
- [19] Bentur, A., Sidney, M. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, London, 1990.
- [20] Cem-FIL International Limited. *Guide to Premix Manufacture*. Vetrotex.
- [21] Cem-FIL International Limited. *Guide to Spray Manufacture*. Vetrotex.
- [22] Vefago, L. *Fachadas Pré-fabricadas em Argamassa Reforçada com Fibra de Vidro em Três Estudos de Caso na Grande Porto Alegre*. Dissertação de Mestrado. UFSC, 2006.
- [23] Ribeiro, F. *Especificação de Juntas de Movimentação em Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios: Levantamento do Estado da Arte*. Dissertação de Mestrado. USP, 2006.

- [24] Canadian Precast Concret Institute – CPCI. *Architectural Precast Concret – Sealant & Joint Guide*. Canadian Precast Concret Institute, Canadá.
- [25] Sika Portugal. *Ficha Técnica 470 – Cordão Sika (revisão 2)*, Vila Nova de Gaia, 2000.
- [26] <http://www.isolite.pt/prod/pdfs/acessorios.pdf>. 04/04/2008.
- [27] British Adhesives and Sealants Association – BASA. *The BASA Guide to the ISO 11600 Classification os Sealants for Building Constrution*. BASA, Herts, 1999.
- [28] Silva, M., Silva, V. *Paineis de Vedação*, BSP Professional Books, Oxford, 1991.
- [29] Corvacho, M. *Catálogo de Pontes Térmicas – Nota de Informação Técnica 003*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, 1999.
- [30] Abreu, M. *Correcção de Pontes Térmicas em Intervenções de Reabilitações*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2003.
- [31] Corvacho, M. *Pontes Térmicas – Análise do fenómeno e propostas de soluções*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 1996.
- [32] Corvacho, M. *Estudo das Pontes Térmicas na Envolvente dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 1987.
- [33] Henriques, F. *Heterogeneidade em Elementos da Envolvente Exterior de Edifícios*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 1998.
- [34] <http://www.termografiasaluteambiente.it> 04/01/2008.
- [35] Decretos-Lei, *Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE)*, Decreto-Lei 80/2006, 4 de Abril 2006.
- [36] Freitas, V. *Isolamento Térmico – Aplicação de Poliestireno Extrudido na Envolvente dos Edifícios*, Iberfibran, Ovar, 2006.
- [37] Camelo, S., Santos, C. *Manual de Apoio à Aplicação do RCCTE*. INETI, Lisboa, 2005.
- [38] Santos, C., Matias, L. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios – ITE 50*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Lisboa, 2006.
- [39] Franco, L. *O Projecto das Vedações Verticais: Características e a Importância para a Racionalização do Processo de Produção*, Universidade São Paulo – USP, São Paulo.
- [40] Honeywell. *El Aislamiento y el PUR. Características y aplicaciones*. Honeywell S.L., Madrid.
- [41] Dow. *Fichas Técnicas Roofmate Wallmate Floormate*, Vila Nova de Gaia, 2000.
- [42] Mendonça, P. *Habitar Sob Uma Segunda Pele – Estratégia para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperado*. Tese Doutoramento. Universidade do Minho, 2005.
- [43] Labrincha, J. *Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro – Sub Projecto de Isolamento Térmico (1º Relatório de Progresso)*. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005