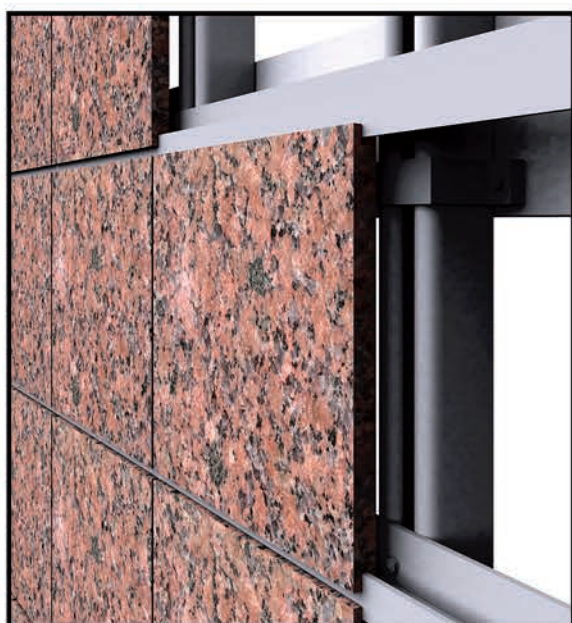


Rui de Sousa Camposinhos

Revestimentos em Pedra Natural COM FIXAÇÃO MECÂNICA

Dimensionamento e Projecto



EDIÇÕES SÍLABO

Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Mecânica

Dimensionamento e Projecto

RUI DE SOUSA CAMPOSINHOS



É expressamente proibido reproduzir, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, **NOMEADAMENTE FOTOCÓPIA**, esta obra. As transgressões serão passíveis das penalizações previstas na legislação em vigor.

Esta obra teve o patrocínio:



Editor: Manuel Robalo

FICHA TÉCNICA:

Título: Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Mecânica

Autor: Rui de Sousa Camposinhos

© Edições Sílabo, Lda.

Capa: Pedro Mota

1ª Edição

Lisboa, 2009.

Impressão e acabamentos: Europress, Lda.

Depósito Legal: 301238/09

ISBN: 978-972-618-561-1

EDIÇÕES SÍLABO, LDA.

R. Cidade de Manchester, 2

1170-100 Lisboa

Tel.: 218130345

Fax: 218166719

e-mail: silabo@silabo.pt

www.silabo.pt

Índice

Índice de figuras	11
Índice de tabelas	13
Índice de quadros	15
Agradecimentos	17
Prefácio	19
Simbologia	21
Introdução	27

Capítulo 1

Caracterização da pedra natural

1. Tipos de rocha	34
1.1. Rochas ígneas	34
1.2. Rochas sedimentares	35
1.3. Rochas metamórficas	36
2. Normalização	38
3. Identificação e caracterização física	41
3.1. Terminologia, características geométricas e petrografia	41
3.2. Determinação do coeficiente de dilatação linear térmica	43
3.3. Massa volúmica aparente e porosidade aberta	44
3.4. Absorção de água à pressão atmosférica e por capilaridade	45
3.5. Resistência aos agentes atmosféricos	46
3.6. Resistência ao gelo	46
3.7. Resistência à cristalização de sais	48
3.8. Resistência ao envelhecimento por choque térmico	50

4. Caracterização mecânica	50
4.1. Resistência à flexão	51
4.2. Resistência das ancoragens	52
4.3. Módulo de Elasticidade	53
5. Tipos de acabamento	54

Capítulo 2

Sistemas de fixação

1. Tipos de ancoragem	60
1.1. Aspectos gerais a observar	63
1.2. Componentes metálicos	63
1.3. Materiais vedantes não cimentícios	64
1.4. Materiais cimentícios	66
1.5. Ventilação e estanquidade	66
2. Ancoragem por cavilhas	67
2.1. Disposição e número de cavilhas	70
2.2. Posicionamento da furação e dimensões	75
3. Ancoragens lineares	77
3.1. Ancoragens com régua de reforço	83
4. Ancoragens no tardo	85
5. Ancoragem com discos	87
6. Ancoragens com agramos	89
7. Ancoragem com arames	90

Capítulo 3

Estados-limite

1. Estados-limite e acções a considerar	95
2. Acções e combinações	97
2.1. Combinações de acções – estados-limite de últimos	97
2.2. Combinações de acções – estados-limite de utilização	98
2.3. Coeficientes de combinação	99

Quantificação das acções

1. Acção do vento	103
2. Acção sísmica	104
2.1. Elementos rígidos	105
2.2. Elementos flexíveis	112
3. Peso próprio	120
4. Acções térmicas e higrométricas	121
4.1. Folgas e largura de juntas	121
4.2. Movimentos de origem térmica	122
4.3. Movimentos de origem higroscópica	123
5. Acção da neve	124
6. Vibrações	124

Fiabilidade e coeficientes de segurança

1. Bases de cálculo	128
1.1. Fiabilidade estrutural	128
1.2. Índice de fiabilidade	130
1.3. Definição do nível de fiabilidade	131
1.4. Diferenciação da fiabilidade	132
1.5. Valores objectivo do índice de fiabilidade	133
1.6. Coeficientes parciais de segurança – pedra natural	134

Resistência à flexão e à tracção

1. Valores característicos	141
2. Resistência à tracção simples	143
3. Diminuição da capacidade resistente, com a idade	145

Cálculo de ancoragens por cavilha

1. Dimensionamento em flexão simples	149
1.1. Estado-limite último de resistência	149
1.2. Estado-limite de deformação	152
2. Resistência ao arrancamento	153

Cálculo de ancoragens em ranhura

1. Dimensionamento em flexão simples	161
1.1. Resistência à flexão	161
1.2. Deformação	162
2. Cálculo da resistência do entalhe	163
2.1. Apoio contínuo	165
2.2. Apoio descontínuo	165
3. Folga e espessura nos apoios	167

Cálculo dos pernos e perfis

1. Resistência à flexão e corte	175
2. Resistência à tracção e corte	177
3. Perfis e pernos em liga de alumínio	178

Exemplos de aplicação

1. Exemplo de aplicação – fixação por cavilhas	184
2. Exemplo de aplicação – fixação com entalhe	185
3. Análise comparativa	186
3.1. Dos tipos de ancoragem	187
3.2. Dos métodos de dimensionamento	188
3.3. Conclusões	189

Bibliografia	191
--------------	-----

Índice de figuras

Figura 1. Descolamento de placa de granito por perda de aderência	29
Figura 2. Principais tipos de acabamento em granitos, calcários e mármore	55
Figura 3. Furação com ranhura, contínua ou descontínua, e furação circular	61
Figura 4. Ancoragem para inserção de cavilha	62
Figura 5. Ancoragens para inserção em ranhuras	62
Figura 6. Posicionamento de tubos de ventilação numa fachada de juntas fechadas	67
Figura 7. Inserções e cavilhas nos bordos horizontais	68
Figura 8. Inserções e cavilhas em bordos sem continuidade	69
Figura 9. Fixação de placas com cavilhas, nos bordos verticais	69
Figura 10. Esquema de fixação com cavilha, para superfícies horizontais	70
Figura 11. Número e pontos de apoio com inserções para cavilhas	71
Figura 12. Esquema de montagem e detalhe de uma ancoragem com cavilha e junta fechada	72
Figura 13. Fixação dos pernos com comprimento adequado à espessura do isolamento térmico	73
Figura 14. Furação da parede resistente	73
Figura 15. Fixação do perno de suporte	74
Figura 16. Ajuste da posição da cavilha e aperto do perno	74
Figura 17. Montagem em sequência das placas	74
Figura 18. Dimensões do bordo apoiado (L_1), do bordo livre (L_2) e marcação dos furos	76
Figura 19. Esquema ilustrativo para fixações em apoio contínuo com ranhura – <i>kerf</i>	78
Figura 20. Apoio descontínuo com apoio em perfil de abas opostas	79
Figura 21. Esquema de apoio com entalhe contínuo e pontos críticos de contacto	80
Figura 22. Transferência das acções da placa para o perfil	80
Figura 23. Pormenorização do sistema de ancoragem com entalhe	81

Figura 24. Solicitação acidental por deformação excessiva dos perfis de apoio	82
Figura 25. Soluções para evitar contacto pontual na aresta interior e inferior das placas	82
Figura 26. Apoio contínuo no bordo inferior de uma placa reforçada	83
Figura 27. Corte C da Figura 26	84
Figura 28. Corte esquemático e vista da ligação oculta com furação no tardo das placas	86
Figura 29. Vista tridimensional de uma ancoragem (estrutura de suporte visível: cantoneiras)	86
Figura 30. Fixação com discos em inox com ranhuras, na posição horizontal	88
Figura 31. Esquema da fixação com discos	88
Figura 32. Esquema da fixação com agramos	89
Figura 33. Ligação com fios amarrados, como reforço de soluções coladas	91
Figura 34. Espectros de resposta segundo o EC8	109
Figura 35. Exemplo da distribuição das funções de densidade de probabilidade $f(E(a))$ e $f(R(r))$	129
Figura 36. Distribuição da variável Z da probabilidade de rotura	131
Figura 37. Placa de pedra com encavilhamento nas juntas horizontais. Comprimento de embutimento igual a ℓ_p	150
Figura 38. Corte esquemático de uma placa na zona de inserção de uma cavilha	153
Figura 39. Aspecto de um provete após ensaios de arrancamento	155
Figura 40. Projecção no plano de uma placa da superfície de destacamento de uma cunha após rotura	155
Figura 41. Vista esquemática de uma placa com ranhura em dois bordos	162
Figura 42. Corte esquemático de um apoio com entalhe	164
Figura 43. Rotura do entalhe com apoio descontínuo	165
Figura 44. Destacamento de dente de placa com apoio parcial – ângulo de rotura	167
Figura 45. Definição do plano de rotura e eixos de tensões	169
Figura 46. Comparação entre a espessura calculada em função da rotura da ancoragem e da rotura a meio vão – fixação por cavilha	184
Figura 47. Comparação entre a espessura calculada em função da rotura da ancoragem e da rotura a meio vão – fixação por entalhe contínuo	186
Figura 48. Comparação entre a espessura calculada para duas soluções de fixação	187
Figura 49. Comparação entre métodos de dimensionamento	188

Índice de tabelas

Tabela 1. Classes de durabilidade de calcários (BRE)	49
Tabela 2. Valores mínimos para o índice de fiabilidade (EC 1990)	133
Tabela 3. Valores-alvo dos índices de fiabilidade, para elementos estruturais da classe RC1 (EC 1990)	134
Tabela 4. Coeficientes parciais de segurança para as placas de pedra ($\beta_1 = 4,2$)	137
Tabela 5. Valores do coeficiente k_p , 5% para o cálculo do valor característico, numa distribuição log-normal, com um intervalo de confiança de 75%	143
Tabela 6. Valores de η – diminuição da resistência da pedra com a idade	146
Tabela 7. Coeficientes de concentração de tensões e ângulo de destacamento (α)	157
Tabela 8. Coeficiente de concentração de tensões (K_k), em apoios com ranhura	171
Tabela 9. Valores característicos da resistência à tracção de aços	176
Tabela 10. Valores característicos de resistência à tracção de aços, em pernos e parafusos comerciais	176
Tabela 11. Características mecânicas das ligas de alumínio utilizadas	178
Tabela 12. Características mecânicas das ligas de alumínio utilizadas	179

Índice de quadros

Quadro 1. Ensaio de identificação e caracterização (CEN/TC 246)	40
Quadro 2. Ensaio de resistência mecânica (CEN/TC 246)	40
Quadro 3. Valores médios de referência para algumas características principais de tipos litológicos	41
Quadro 4. Tolerâncias e espessura nominal	42
Quadro 5. Tolerâncias da largura e comprimento	43
Quadro 6. Valores máximos recomendados da porosidade aberta	44
Quadro 7. Valores máximos recomendados de absorção da água	45
Quadro 8. Número de ciclos de ensaio de gelo e degelo a exigir em fachadas, para um período de 50 anos	48
Quadro 9. Valores dos coeficientes parciais das acções para os estados-limite últimos	98
Quadro 10. Valores dos coeficientes parciais e de combinação de acções em estados-limite de utilização	98
Quadro 11. Valores dos coeficientes de combinação	99
Quadro 12. Coeficientes de dilatação térmica de pedra natural e metais	122
Quadro 13. Valores do coeficiente de expansão higrométrica	123
Quadro 14. Definição das classes de consequências (EC 1990)	132
Quadro 15. Coeficientes de segurança, segundo Alex S. Gere (1988)	138
Quadro 16. Valor de α para determinação da largura efectiva de apoio	166
Quadro 17. Dados para exemplo de aplicação – fixação por cavilhas	184
Quadro 18. Dados para exemplo de aplicação – fixação por entalhe	185

Agradecimentos

Quem escreve um texto de natureza científica ou técnica dificilmente conseguirá fazê-lo sem apoio de amigos e de colegas.

Expresso pois o meu agradecimento a todos que de forma directa ou indirecta contribuíram para que este livro pudesse chegar a bom termo.

Agradeço em particular aos representantes das entidades patrocinadoras que prontamente se empenharam na concessão dos respectivos patrocínios: o Professor João Rocha do ISEP, o Dr. Miguel Goulão da ASSIMAGRA, o Doutor Pedro Amaral da FRONTWAVE e o Sr. Samuel Salgado da SOLANCIS.

Realço e agradeço a forma primorosa como a Elsa Santos passou todos os meus esboços e desenhos para formato digital.

Quero destacar no entanto, de forma especial, as contribuições do Professor A. Serra Neves e do Professor Raimundo Delgado. As suas críticas e sugestões, sempre assertivas e oportunas, valorizaram em muito o texto final.

Prefácio

A pedra natural é um material de uso generalizado ao longo dos tempos devido, essencialmente, à sua robustez, durabilidade e disponibilidade numa grande variedade de cores e texturas. Se durante muitos séculos constituiu praticamente o único material estrutural para as construções duradouras, hoje, com o aparecimento de novos materiais de construção, especialmente o betão armado, a sua utilização tem sido progressivamente dedicada ao revestimento de fachadas de edifícios. No âmbito desta utilização, os desenvolvimentos tecnológicos têm permitido a disponibilização de elementos de revestimento em pedra natural com dimensões cada vez maiores e com menores espessuras, contribuindo para a sua competitividade económica no seu uso, sobretudo quando avaliada no ciclo de vida completo da construção. Este progresso no aumento das dimensões das placas impõe novas exigências no que se refere à avaliação da sua capacidade resistente às acções a que vierem a ser sujeitas de que se destacam as acções do vento e sismos, e ao sistema para a sua fixação, aspecto crucial tendo em vista os potenciais danos que um desprendimento de uma placa de elevado peso pode provocar. Estes elementos têm, assim, de ser objecto de um dimensionamento estrutural de modo a garantir um nível de segurança adequado. Não prevendo a regulamentação de estruturas explicitamente o dimensionamento deste tipo de elementos, impõe-se a adaptação a este caso dos princípios regulamentares existentes, especialmente os previstos na recente regulamentação europeia de estruturas, os eurocódigos. É neste contexto que o presente livro, *Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Mecânica. Dimensionamento e Projecto*, se insere, disponibilizando um vasto manancial de conhecimentos científico e técnicos que, em conjugação com um actual enquadramento regulamentar, permite o dimensionamento e projecto de placas de revestimento de fachadas em pedra natural.

O autor do livro, o Professor Rui Camposinhos, tem dedicado a este tema, nos últimos anos, uma particular atenção, promovendo estudos experimentais, envolvendo a realização de centenas de ensaios de arrancamento de modo a caracterizar o comportamento de diversos tipos de pedra natural, e orientando trabalhos de investigação, de que resultou a publicação de textos sobre o tema em prestigiadas revistas internacionais. A abrangência com que o tema é tratado resulta, também, do seu percurso académico, obtendo o grau de mestre e

depois o doutoramento em temas afins, da sua experiência como professor do ensino superior, no Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, e do trabalho de Investigação que há vários anos tem vindo a desenvolver, integrado em Centros de Investigação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, devendo destacar-se o projecto «Presstone» recentemente iniciado com financiamento da ADI (QREN), de que é coordenador, com vista ao desenvolvimento de um protótipo «Sistemas de Fachada em Pedra Natural Pré-esforçada».

O material do livro encontra-se bem organizado, permitindo que o leitor vá percorrendo os vários tópicos numa sequência adequada, bem escrito e elucidativamente ilustrado, facilitando a compreensão dos diversos aspectos associados ao tema central, o dimensionamento e projecto de placas de revestimento em pedra natural, que se pode considerar dividido em cinco partes. Uma primeira, correspondendo a um capítulo, em que é feita a caracterização da pedra natural, classificando-as por tipos e identificando as suas principais características físicas e mecânicas. Uma segunda parte em que se discutem diversos sistemas de fixação, percorrendo diferentes tipos de ancoragem desde os por cavilhas aos com arames. Numa terceira parte, envolvendo três capítulos, são apresentados os principais conceitos e metodologias de verificação da segurança estrutural, envolvendo os estados-limite a verificar, as principais acções a considerar e os conceitos de fiabilidade e coeficientes de segurança envolvidos num formato de verificação de segurança à luz dos modernos regulamentos de estruturas. Ênfase especial é dada à determinação dos efeitos da acção dos sismos, em que é detalhadamente apresentada uma metodologia geral aplicável a elementos não estruturais ligados a estruturas. Na quarta parte, também com três capítulos, são apresentados todos os aspectos necessários ao dimensionamento propriamente dito e à pormenorização das soluções nomeadamente no que se refere à determinação da resistência das placas, ao cálculo de ancoragens em ranhura e ao cálculo dos pernos e perfis. O livro termina com um capítulo de aplicações, ilustrando os principais tópicos expostos no livro e apresentando uma análise comparativa de soluções.

O conteúdo e o modo como foi desenvolvida a presente obra permitirá que possa vir a constituir a base para uma disciplina a integrar um curso de mestrado ou doutoral, será de enorme utilidade para todos aqueles, nomeadamente estudantes ou técnicos de engenharia, que desejem obter ou ampliar os conhecimentos nesta temática e constituirá, certamente, um indispensável instrumento para os todos os profissionais de engenharia envolvidos no projecto ou aplicação de placas de pedra natural em fachadas.

Raimundo Delgado

Professor Catedrático da FEUP

Simbologia

■ MAIÚSCULAS LATINAS

- A – Área de destacamento de uma cunha; Factor de amplificação.
- A_m – Factor de amplificação em função do coeficiente de amortecimento.
- A_v – Área da secção do perno ou cavilha.
- B – Largura da placa.
- B_{ef} – Largura efectiva de apoio.
- C – Folga.
- C_d – Valor limite de cálculo correspondente ao critério de utilização em causa.
- C_{fz} – Coeficiente de aceleração.
- C_m – Coeficiente de aceleração para um elemento rígido.
- C_N – Coeficiente de aceleração ao nível médio da cobertura do edifício.
- C_z – Coeficiente sísmico para elementos rígidos.
- D – Profundidade de embutimento de um perfil.
- E – Módulo de elasticidade.
- E_d – Módulo de elasticidade dinâmico.
- F_{Ek} – Efeito da acção sísmica.
- F_p – Força de arrancamento no instante da rotura.
- F_R – Força de rotura no arrancamento.
- $F_{t,Rd}$ – Valor de cálculo do esforço resistente de tracção.
- G_d – Acções permanentes.
- H – Altura do edifício.
- H_f – Largura efectiva de apoio; Profundidade total do entalhe.
- I – Momento de inércia.
- I_g – Índice de gelo de uma região.
- K_1 – Factor de concentração de tensões em furação circular.
- K_k – Factor de concentração de tensões em entalhe.
- L – Comprimento entre juntas; Distância entre apoios; Vão.

L_1 – Distância na direcção perpendicular a um bordo livre.
 L_2 – Distância na direcção paralela a um bordo livre.
 L_{cant} – Comprimento de apoio.
 L_{kerf} – Comprimento de apoio de um perfil.
 M_1 – Momento flector máximo no bordo apoiado.
 M_2 – Momento flector máximo no bordo livre.
 M_E – Massa de um elemento;
 M_{Sd} – Valor de cálculo de um momento flector.
 N – Número de pisos acima do piso térreo.
 Q_d – Acções variáveis.
 R – Resultante das tensões de tracção.
 R_1 – Aceleração espectral de resposta para o período fundamental de vibração.
 R_E – Coeficiente de comportamento de um elemento.
 R_k – Valor característico correspondente ao quantilho inferior de 5%.
 R_m – Média dos valores observados.
 S – Factor do terreno.
 S_{DS} – Aceleração espectral de resposta para os períodos de curta duração.
 S_I – Coeficiente de aceleração correspondente a pisos intermédios.
 S_{Sd} – Espectro de resposta médio relativo.
 T_1 – Período fundamental de vibração do edifício na direcção em causa.
 T_a – Período fundamental de vibração do elemento não estrutural.
 T_c – Período fundamental de um elemento.
 T_{ed} – Período fundamental do edifício.
 V_{pRd} – Valor de cálculo do esforço de corte resistente.
 V_r – Coeficiente de variação da resistência.
 V_{Sd} – Valor de cálculo do esforço de corte actuante.
 W – Peso do elemento.
 W_{el} – Módulo elástico de flexão da secção considerada.
 W_P – Módulo plástico de flexão da secção considerada.
 X – Parâmetro de resistência.
 X_{Rd} – Valor característico da resistência em causa.

■ MINÚSCULAS LATINAS

- a – Distância do eixo de uma furação ao bordo mais próximo.
- a_1, a_n – Coeficientes espectrais de resposta para o primeiro piso e cobertura respectivamente.
- b – Largura da placa ou laje de revestimento; Valor correspondente ao produto do factor de participação do primeiro modo de participação pelo coeficiente de forma do primeiro modo ao nível da cobertura.
- c_{abs} – Coeficiente de absorção de água à pressão atmosférica.
- c_e – Coeficiente de exposição que depende, entre outros factores, da rugosidade e topografia do terreno.
- c_{pe} – Coeficiente de pressão exterior.
- d – Espessura da placa ou laje de revestimento
- d_{ef} – Profundidade efectiva do entalhe.
- $f_{0,2\%}$ – Tensão convencional de rotura correspondente a uma extensão residual igual a 0,2%.
- $f_{máx}$ – Flecha máxima admitida.
- f_{ub} – Valor característico da tensão de rotura à tracção simples.
- f_y – Valor característico da tensão convencional de cedência à tracção simples.
- h – Altura dos prismas de ensaios; Altura total do edifício medida entre a base e o nível da cobertura.
- k – Factor de susceptibilidade ao gelo da zona construída.
- k_2 – Coeficiente que tem em conta o efeito de alavanca devido à existência de camisas de ajuste e amortecimento.
- k_{d1} – Coeficiente de concentração de tensões na direcção L_1 .
- k_{d2} – Coeficiente de concentração de tensões na direcção L_2 .
- $k_{p,5\%}$ – Coeficiente para o cálculo do valor característico numa distribuição log-normal para um intervalo de confiança de 75%.
- k_r – Coeficiente correspondente ao quantilho inferior (5%) da variável em função de distribuição assumida.
- l_p – Comprimento de embutimento da cavilha.
- m – Massa do elemento por unidade de largura; Número de ordem do piso em que o elemento está colocado.
- n – Vida útil em anos; Número de ensaios efectuados; Porosidade aberta da pedra natural.

- q_{ref} – Pressão média de referência correspondente à velocidade de referência do vento.
- s – Desvio padrão dos valores observados.
- t – Temperatura mínima do ensaio em valor absoluto; Espessura nominal da placa.
- t_f – Espessura do dente da placa na zona do entalhe
- t_k – Espessura do entalhe.
- v_{ref} – Velocidade de referência do vento.
- w_{Sd} – Valor de cálculo da acção superficial actuante na placa perpendicular ao seu plano.
- w_{Sk} – Valor característico da acção superficial actuante na placa perpendicular ao plano solicitado; Valor característico dessa pressão dinâmica do vento.
- x_i – Valor observado num dado ensaio de ordem i .
- z – Altura a que se situa o elemento em estudo contado a partir da cota do piso térreo do edifício; Cota da fixação do elemento na estrutura.
- z_1 – Cota do primeiro piso acima do solo.
- z_e – Altura de referência para a pressão num dado ponto.
- z_m – Altura acima do solo da cota de fixação do elemento.

■ MAIÚSCULAS GREGAS

- Δ_{lm} – Movimentos higrométricos.
- Δ_{lt} – Variação dimensional térmica.
- Δ_m – Variação do teor de humidade no material.
- ΔM – Variação de massa relativamente à massa seca inicial.
- Δ_t – Variação de temperatura.
- Φ – Diâmetro do furo para inserção do conjunto bucha e cavilha.

■ MINÚSCULAS GREGAS

- α – Ângulo de destacamento na rotura medido no bordo da placa de pedra; Factor de aceleração relativa do terreno.
- α_m – Coeficiente de expansão higrométrica.
- α_t – Coeficiente de dilatação térmica linear.
- β – Índice de fiabilidade.

- β_1 – Índice de fiabilidade para um ano.
- β_n – Índice de fiabilidade referente a um dado período de referência em anos.
- δ – Parâmetro que mede a relação entre a largura efectiva de apoio e a largura total de uma placa.
- ϕ – Diâmetro da furação.
- γ_a – Factor de importância.
- γ_d – Peso específico seco da pedra natural.
- γ_G – Coeficiente de segurança relativo às acções permanentes.
- γ_Q – Coeficiente de segurança relativo às acções variáveis.
- γ_{sat} – Peso específico saturado.
- γ_w – Peso específico da água.
- γ_M – Coeficiente parcial de segurança.
- η – Coeficiente que reflecte a diminuição de capacidade resistente da pedra.
- φ – Coeficiente de fluência da pedra natural.
- ρ – Densidade do ar.
- σ_{nom} – Valor da tensão nominal principal no plano do dente do entalhe.
- σ_R – Valor da tensão de resistência à tracção da pedra.
- σ_{Rd} – Valor da tensão de resistência de cálculo da tensão resistente à flexão da pedra natural.
- σ_{Rdt} – Valor de cálculo da tensão resistente da pedra à tracção.
- σ_{Rfk1} – Valor característico da resistência à tracção em flexão de um conjunto de provetes de volume v_1 .
- σ_{Rfk2} – Valor característico da resistência à tracção em flexão de um conjunto de provetes de volume v_2 .
- σ_{Rkt} – Valor da tensão resistente característica à flexão da pedra; Resistência à tracção uniaxial.
- σ_{Sd} – Valor de cálculo da tensão máxima de tracção.
- σ_{uc} – Tensão principal de compressão atinge a tensão de rotura por compressão.
- σ_{ut} – Tensão principal de tracção atinge a resistência à tracção da pedra.
- ξ – Relação entre factores de concentração de tensões.
- ψ_i – Designação genérica dos coeficientes que determinam os valores reduzidos das acções.
- ζ – Relação entre as dimensões dos lados de uma placa.

Introdução

A utilização da pedra natural como revestimento nos edifícios, sobretudo em fachadas, além de ser uma solução associada a custos de manutenção reduzidos, é universalmente adoptada tanto pela sua excelência estética como pela durabilidade que lhe é reconhecida.

Nas primeiras décadas do século XX, a pedra como elemento exterior de construção granjeou um papel determinante na construção de edifícios e definitivamente marcante em muitos ícones da arquitectura. A partir de então, a progressiva e generalizada utilização das estruturas em betão armado fez com que a pedra natural passasse quase que exclusivamente a ter uma função de revestimento.

O estudo dos revestimentos com pedra natural, principalmente em fachadas, assume grande importância devido à evolução tecnológica ao nível dos equipamentos de corte, a qual permite que a indústria transformadora de rochas consiga fornecer ao mercado produtos de placas de maior dimensão e espessuras cada vez mais reduzidas. O desempenho dos revestimentos, até então assente em pressupostos que pouco têm a ver com a tradição das utilizações, das formas, do conhecimento e das técnicas de outrora, ficou comprometido. São conhecidas diversas patologias, anomalias, avarias e por vezes acidentes que resultam de uma deficiente utilização deste recurso, nomeadamente a aplicação de placas de pedra coladas; solução que, tendo sido utilizada nas últimas décadas, tem vindo a ser abandonada.

O método de fixação, que consiste na colagem das pedras por contacto superficial, supostamente uniforme, ao longo da superfície de suporte, acarreta várias desvantagens, sobretudo devido a incompatibilidade entre o elemento de revestimento e a base de suporte, constituindo uma ligação rígida. Desta «solidarização» resultam tensões que se geram na interface devido à deformação impedida entre os elementos de revestimento, o produto de preenchimento das juntas, o produto de colagem e a camada de suporte (parede de alvenaria, elemento de betão ou outra estrutura de base).

O suporte e os constituintes do revestimento têm, por natureza, variações dimensionais diferentes, quando sujeitos às mesmas acções. Este facto resulta de serem diferentes as características mecânicas e físicas dos elementos de revestimento, dos produtos de colagem e do suporte. Estas restrições dão origem a tensões na interface do revestimento, cuja concentração aumenta do centro para a periferia, sendo, portanto, superiores nas juntas entre placas. Como consequência, surgem diversas disfunções e patologias que, potenciadas pelas variações térmicas e higrométricas, resultam no descolamento das placas de revestimento.

Por outro lado, e sendo o coeficiente de dilatação térmica das pedras, embora variável, muito inferior ao das resinas epóxicas, dever-se-á evitar que a segurança das ligações dependa da resistência química de aderência e da colagem destas resinas. As deformações diferenciais térmicas das resinas e das pedras comprometem a integridade das referidas ligações coladas.

São conhecidas várias situações de descolagem e queda dos revestimentos (Figura 1) que põem em risco a vida de transeuntes ou os ocupantes dos próprios edifícios, pelo que a escolha do tipo de pedra, as técnicas de execução, a modulação dimensional, o método de fixação e instalação dos respectivos componentes devem ser projectados e dimensionados de acordo com as capacidades e limitações de cada tipo de pedra e sistema de fixação, acomodando ou transferindo as acções mecânicas, físicas e químicas, a que o conjunto estará sujeito ao longo de um dado período de vida útil.

Em alternativa a colagem a solução que se tem vindo a implementar é a da fixação mecânica, *i.e.*, com recurso a dispositivos, geralmente metálicos, para inserção em ranhuras ou furações que são realizadas nas placas.

Pese embora se comece a verificar que o custo inicial das duas soluções, de colagem e de fixação mecânica, é sensivelmente o mesmo, são inegáveis as vantagens competitivas dos sistemas que utilizam revestimento não aderente, fixado com recurso a dispositivos mecânicos. É neste sentido que se dá especial tratamento ao revestimento de fachadas por métodos de fixação mecânica não aderente.

Os princípios que têm vindo a ser adoptados para o dimensionamento da pedra natural e das respectivas fixações são, geralmente, pouco fundamentados. Os coeficientes de segurança e simplificações que se admitem, baseiam-se, geralmente, em métodos ultrapassados que não se revelam adequados às actuais aplicações da pedra natural no revestimento exterior, nem aos modernos procedimentos de dimensionamento.

Figura 1. Descolamento de placa de granito por perda de aderência



É, pois, necessário converter os métodos usados actualmente em modernos processos de dimensionamento, adequados à actual realidade do cálculo estrutural. A implementação da maioria dos Eurocódigos Estruturais constitui também razão incontornável para a adopção de uma nova metodologia de dimensionamento dos revestimentos em pedra natural que deverá ser também adoptada nas fachadas.

Os Eurocódigos Estruturais já em utilização ou implementados para quase todos os materiais não contemplam a pedra natural – «material» que tem acompanhado a humanidade desde o início da sua existência! A utilização da pedra natural à luz dos mais recentes e modernos critérios estruturais de projecto (fundamentados em conceitos teóricos sólidos e acessíveis), aliados à experiência em obra e à validação experimental, será, com certeza, a via mais adequada para colmatar esta diferença competitiva.

É conhecida a limitação das escolas de engenharia no ensino das matérias relacionadas com o projecto e aplicação de revestimentos de pedra natural em edifícios. É neste sentido e desta forma que se pretende contribuir, quer a nível interno quer a nível internacional, para o reconhecimento das mais-valias deste nobre material bem como para o crescimento do seu papel no desenvolvimento sustentado da economia da construção, reforçando a presença da indústria e