

# **Abordagem a um modelo de previsão da vida útil de revestimentos cerâmicos aderentes**

## **Service life prediction modelling of adhesive ceramic tiling systems**

**Rita Bordalo<sup>1</sup>, Jorge de Brito<sup>2</sup>, Pedro L. Gaspar<sup>3</sup>, Ana Silva<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Eng.<sup>a</sup> Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

*rita\_bordalo@msn.com*

<sup>2</sup>Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

*jb@civil.ist.utl.pt*

<sup>3</sup>Professor Assistente da Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa

*pmgaspar@fa.utl.pt*

<sup>4</sup>Eng.<sup>a</sup> Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

*anasilva931@msn.com*

**RESUMO:** O presente documento aborda a previsão da vida útil de revestimentos cerâmicos aderentes com a utilização de uma metodologia cuja aplicação foi já demonstrada em rebocos correntes e revestimentos em pedra natural. No âmbito deste estudo, foram inspeccionados, através de inspecções visuais *in situ*, 117 revestimentos cerâmicos situados na área de Lisboa. O presente texto foca-se na aplicabilidade do modelo ao caso concreto dos revestimentos cerâmicos, fazendo-se referência à complexidade do sistema construtivo deste tipo de revestimentos e, conseqüentemente, à sua elevada susceptibilidade face a erros de projecto, execução e selecção dos materiais. Pretende-se assim fornecer uma primeira ferramenta para a estimativa da durabilidade dos revestimentos cerâmicos aderentes e dos factores que a influenciam.

**ABSTRACT:** This paper discusses service life prediction of adhesive ceramic tiling systems through the use of a methodology whose efficacy has been demonstrated for current render and natural stone cladding. Within this study, *in situ* visual inspections were performed on 117 tiling systems in the Lisbon (Portugal) area. The paper focuses the applicability of an empirical methodology of field data collection to this type of cladding and discusses the complexity of this constructive system and the consequent high susceptibility to design, execution and materials selection errors. The aim is to provide a preliminary tool to estimate the durability of ceramic tiling systems and identify the factors that influence it.

## **1 INTRODUÇÃO**

Portugal possui uma longa tradição na produção e comercialização de azulejaria, tanto na execução de painéis como na aplicação em revestimentos. Os materiais cerâmicos possuem uma enorme variedade (em termos de dimensões dos ladrilhos, cores, texturas, entre outras características), sendo considerados, em países mediterrâneos, como dos materiais mais nobres para aplicação em revestimentos [1] [2]. Apesar de existirem provas da durabilidade deste tipo de revestimentos, como edifícios centenários que mantêm a totalidade dos elementos cerâmicos que constituem o

revestimento, nas últimas décadas tem ocorrido uma diminuição significativa na utilização deste tipo de revestimentos. De facto, tem-se vindo a assistir a uma mudança na metodologia construtiva deste tipo de revestimentos, que se verifica tanto no material de assentamento como no próprio suporte. Alguns autores [3] [4] apontam como principal razão para a diminuição da utilização destes revestimentos a elevada incidência de anomalias que se verificam ao longo da sua vida útil e que, assim, conduzem à diminuição da mesma. Em alguns países, foi mesmo interdita, pelas autoridades locais, a utilização de revestimentos cerâmicos aderentes em fachadas

acima do 4º andar, devido ao elevado número de anomalias verificado [5].

Pode assim questionar-se o motivo que levou à crescente incidência de anomalias neste tipo de revestimentos. Alguns autores afirmam que os revestimentos cerâmicos aderentes são extremamente susceptíveis a erros de projecto, execução e selecção dos materiais utilizados [6]; este facto, associado às crescentes exigências do mercado da construção, à redução dos prazos de construção e à falta de formação dos técnicos envolvidos na fase de projecto e execução, pode justificar a ocorrência exacerbada de anomalias nos revestimentos cerâmicos aderentes.

Considera-se assim relevante o estudo da evolução da degradação dos revestimentos cerâmicos aderentes. O principal objectivo do presente estudo é desenvolver uma primeira abordagem a uma metodologia de previsão da vida útil dos revestimentos cerâmicos aderentes, recorrendo a um modelo cuja aplicação foi já demonstrada para rebocos correntes e revestimentos pétreos; é portanto explorada a aplicação do modelo ao caso concreto dos revestimentos cerâmicos, assim como identificadas as limitações do mesmo face a este tipo de revestimentos. A validação do modelo de degradação baseou-se no levantamento do estado de degradação de 117 casos de estudo, sendo este levantamento efectuado através de inspecções visuais *in situ*.

## 2 ENQUADRAMENTO

Ao longo das últimas décadas, tem havido um crescente interesse em torno da determinação da durabilidade e da vida útil dos materiais e componentes de estruturas e edifícios. Nos últimos anos, têm sido conduzidos vários estudos para avaliar o impacte ambiental dos materiais de construção utilizados em pavimentos e revestimentos de paredes, incluindo os revestimentos cerâmicos [2]. Segundo Hovde [7], este interesse tem como base as questões ambientais e económicas que cada vez têm um maior peso na tomada de decisões no sector da construção.

De facto, a produção e transporte dos materiais de construção implicam a produção de diferentes tipos de resíduos. Alguns elementos possuem uma vida útil relativamente curta, o que implica a sua eliminação e, conseqüentemente, a produção de

elementos de substituição [8]; assim sendo, em termos técnicos e ambientais, torna-se fundamental o conhecimento da vida útil dos elementos da construção, para proceder a uma avaliação informada da solução mais vantajosa.

A estimativa a vida útil é feita geralmente a partir do conhecimento do material e do seu estado de deterioração, sendo escolhidas como indicadores determinadas propriedades mensuráveis [9]. Segundo alguns autores [7] [10] [11] [12], os métodos de previsão da vida útil podem ser caracterizados por três abordagens diferentes: os métodos determinísticos, os probabilísticos e os de engenharia. Os métodos determinísticos baseiam-se no estudo dos factores de degradação que afectam os elementos estudados, na compreensão dos seus mecanismos de actuação e, por fim, na sua quantificação traduzida em funções de degradação; estes factores são depois traduzidos em fórmulas que expressam a sua acção ao longo do tempo, até que o valor mínimo aceitável de desempenho do elemento estudado seja atingido [9]. Os métodos probabilísticos que são, normalmente, baseados em cálculo matricial ou probabilístico, definem a probabilidade de ocorrência de uma mudança de estado de um elemento, procurando deste modo ultrapassar a incerteza relacionada com a sua forma de degradação e a própria imprevisibilidade das respectivas condições de serviço. Finalmente, os métodos de engenharia são de fácil utilização, tal como o método factorial, mas descrevem os processos de degradação de forma probabilística, tal como os métodos probabilísticos [13]; podem ser usados para identificar de forma mais analítica os fenómenos de degradação, podendo assim controlá-los em fase de projecto ou através do planeamento metódico de manutenções [14].

Desenvolveu-se uma metodologia de previsão da vida útil dos rebocos correntes baseada na definição de um índice numérico que permite exprimir a degradação global dos revestimentos inspeccionados. Esta informação pode ser expressa graficamente através de uma nuvem de pontos, cujas abcissas correspondem à variável “idade” e as ordenadas à variável “severidade” para a amostra estudada [15]; conhecida esta nuvem, é possível determinar a curva de degradação do material através do traçado da curva de regressão da amostra [16]. Os autores desta metodologia [15] [17] obtiveram assim um coeficiente de determinação (ou quadrado do coeficiente de

correlação momentânea do produto de Pearson ( $R^2$ ) - que representa a percentagem da variância da variável “severidade” que é explicada pelo modelo - na ordem de 0,9. Por sua vez, um estudo levado a cabo por Silva [18], utilizando a mesma metodologia para os revestimentos pétreos, permitiu obter um  $R^2$  na ordem de 0,7. Por serem dados obtidos através de inspecções visuais e face à complexidade inerente aos processos de degradação dos materiais, considera-se que os valores obtidos indicam um bom ajustamento do modelo face à realidade modelada.

A aplicação do modelo de previsão da vida útil ao caso concreto dos revestimentos cerâmicos aderentes torna-se mais difícil. De facto, este tipo de revestimentos apresenta uma maior complexidade no sistema construtivo comparativamente aos rebocos correntes e aos revestimentos pétreos. Genericamente, um sistema de revestimentos cerâmicos aderentes inclui o material cerâmico, o substrato, um adesivo necessário para garantir a aderência do cerâmico ao substrato e o material de colmatação das juntas [19]; quando um dos materiais utilizados não é o mais adequado, quando não são previstas, na fase de projecto, as condições de utilização do revestimento ou quando ocorrem erros graves de execução, é posta em causa toda a segurança e funcionalidade do revestimento.

### 3 TRABALHO DE CAMPO

#### 3.1 Descrição da amostra

Os revestimentos cerâmicos correspondem a uma pequena percentagem dos revestimentos de fachada em Portugal (5.5% em edifícios construídos entre 1946 e 2001) [20] e a sua utilização encontra-se muitas vezes associada a modas. Por este motivo, o conjunto de revestimentos cerâmicos estudados apresenta uma grande variabilidade de épocas de construção, que se inicia no século XX e termina actualmente.

Existem claramente picos de utilização deste tipo de revestimento em fachada, que se verificam tanto na amostra (grande diminuição de revestimentos cerâmicos nas épocas 1920 a 1949) como no conjunto do edificado segundo a informação recolhida, o que pode ser explicado por razões socioeconómicas. No entanto, para este estudo, o dado temporal mais importante para cada

revestimento cerâmico aderente não foi o ano de construção do edifício mas sim a idade dos revestimentos cerâmicos, ou seja, o tempo decorrido desde a sua última reparação efectuada até à data da inspecção. Assim, a amplitude da amostra foi bastante inferior à variável anterior correspondendo a variações de idades entre 1 e 63 anos.

#### 3.2 Ocorrência de anomalias

Para alguns autores [21] [22], as principais anomalias registadas em revestimentos cerâmicos são as eflorescências, os descolamentos e a fendilhação. Por sua vez, Silvestre e Brito [1] dividem as anomalias em revestimentos cerâmicos em quatro grupos distintos: anomalias de aderência / descolamento dos elementos cerâmicos; fendilhação dos elementos que constituem o revestimento cerâmico aderente (RCA); deterioração dos elementos dos RCA, afectando directamente o seu desempenho; e anomalias de natureza estritamente estética. Outros autores referiram ainda a importância da deterioração de juntas para a degradação global dos revestimentos cerâmicos [23] [24]; Silvestre e Brito [25] referem que existe uma elevada incidência de anomalias no material de juntas dos revestimentos cerâmicos, visto tratar-se do componente / elemento mais susceptível face aos agentes agressivos.

Tendo por base o referido, considerou-se, no presente documento, que as anomalias presentes nos revestimentos cerâmicos podem ser agrupadas em:

- anomalias visuais - são aquelas que, apesar de normalmente não contribuírem para a perda de desempenho dos revestimentos, o fazem para a sua degradação visual;
- fendilhação - foi subdividida em três tipos: a fendilhação do vidro, a fendilhação sem direcção preponderante e a fendilhação com direcção marcada; esta distinção permite uma definição inequívoca dos diversos graus de degradação atendendo às características de cada tipo de fendilhação (Fig. 1); a fendilhação do vidro corresponde à fendilhação da superfície esmaltada do ladrilho, com a aparência de uma teia de aranha; é normalmente causada pelo envelhecimento dos ladrilhos ou pela diferença entre os coeficientes de expansão térmica do esmalte e do corpo da placa; as

fendas com direcção marcada, por sua vez, decorrem de uma fendilhação larga com orientação bem definida; por fim, a fendilhação sem direcção preponderante é de menor espessura, distribuída por zonas extensas do revestimento e sem uma orientação bem definida;

- anomalias em juntas - apesar de incidirem apenas na argamassa de preenchimento das juntas, comprometem o desempenho global dos revestimentos cerâmicos, já que as juntas são responsáveis pela sua estanqueidade e capacidade de absorver deformações;
- descolamento - é a anomalia mais grave devido às consequências que a queda dos elementos cerâmicos das fachadas dos edificios pode ter e aos custos de reparação associados [26]; a esta anomalia correspondem três situações distintas: a perda de aderência ou descolamento, o empolamento e o destacamento dos ladrilhos cerâmicos.



Fig. 1 - Exemplos dos diferentes tipos de fendilhação: do vidroado, com direcção marcada e sem direcção preponderante (da esquerda para a direita)

Dos dados recolhidos no trabalho de campo, foi possível aferir que, dos 117 revestimentos cerâmicos aderentes inspeccionados, apenas 5,1% não apresentava qualquer anomalia. Nos restantes casos, foi possível verificar que as anomalias em juntas são as mais recorrentes, ocorrendo em 99 casos, seguidas das anomalias visuais (89 casos) e da fendilhação (80 casos); por fim, o descolamento dos elementos cerâmicos ocorre em 47 dos 117 revestimentos inspeccionados.

### 3.3 Factores de ponderação da condição das anomalias

Depois de descritas as anomalias a registar, foi necessário definir a sua hierarquização no intuito de estabelecer patamares de degradação. Esta hierarquização teve em conta a extensão do revestimento afectado pelas anomalias, a

contribuição das mesmas para a degradação global do revestimento e a probabilidade da mudança de um nível para o outro. Esta mudança foi analisada nos casos que envolvem anomalias dependentes (empolamento / descolamento, deterioração das juntas / perda de material).

Vários autores propuseram sistemas de classificação de defeitos (escalas de degradação) com o intuito de exprimir a degradação visual e funcional dos elementos analisados [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33]. Estas escalas, definidas através de variáveis discretas, pretendem descrever desde as situações de ausência de degradação visível (nível de condição mais favorável) até à degradação extensa ou perda de funcionalidade (nível de condição mais desfavorável). As escalas de degradação são, regra geral, lineares com critérios de definição que variam de autor para autor; alguns definem estas escalas tendo em conta as operações de manutenção [31] [33]; outros associam a cada nível de degradação a extensão da degradação detectada [27] [30]. Assim, foi definida uma escala de degradação para os revestimentos cerâmicos aderentes (Tabela 1) que tem cinco níveis de condição entre o nível 0 (sem degradação visível) e o 4 (degradação generalizada), correspondendo o nível 3 ao fim da vida útil dos revestimentos cerâmicos aderentes.

Van Winden e Dekker [34] propuseram uma escala de degradação com 6 níveis, onde a ponderação dos níveis de degradação propostos não é feita de forma linear; os autores associam a cada nível de degradação um peso numérico, conferindo assim uma relação exponencial entre os níveis de degradação. Gaspar [15] refere que uma relação exponencial entre os níveis de degradação poderá traduzir os fenómenos físicos que ocorrem durante o processo de deterioração: mais lento e com menor gravidade no início e mais acelerado conforme começam a ocorrer fenómenos de sinergia entre mais do que um tipo de anomalia, criando uma situação a que alguns autores se referem como “patologia” (resultante da combinação de mais do que uma origem de um ou mais problemas detectados).

Por sua vez, Tuutti [35] estabeleceu um modelo de evolução da degradação para estruturas em betão armado, centrando-se na corrosão das armaduras. Este modelo, que é actualmente aceite e vulgarmente utilizado, estabelece duas fases distintas de degradação: iniciação e propagação. Fazendo uma analogia com o modelo de Tuutti

[35], pode dizer-se, no caso dos revestimentos cerâmicos aderentes, que, na fase de iniciação, os fenómenos de degradação ocorrem de forma lenta e as anomalias manifestadas são pouco condicionantes, por si só, para o fim da vida útil deste tipo de revestimentos; por outro lado, é na fase de propagação que se verifica a perda de desempenho dos revestimentos que poderá resultar da sobreposição de um ou mais mecanismos de degradação que ocorrem não como um processo meramente aditivo de efeitos, mas como um sistema com entropia, de tal modo que uma determinada acção afecte as outras e vice-versa [15]. Assim sendo, foi utilizada uma escala exponencial (Fig. 2) na ponderação dos níveis de degradação propostos para os revestimentos cerâmicos aderentes.

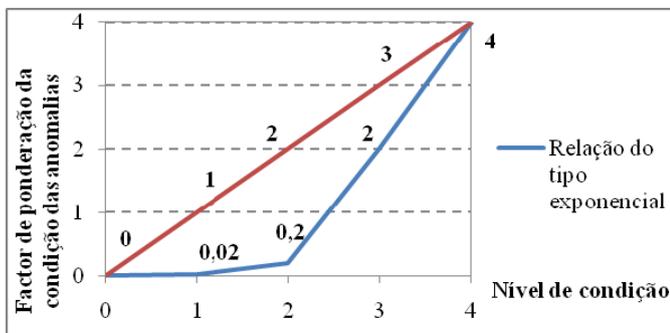


Fig. 2 - Comparação entre diferentes formas de ponderação dos níveis de degradação dos revestimentos cerâmicos aderentes

Definidos os níveis de degradação, foi possível apurar na realização do trabalho de campo que cerca de 46,6% das anomalias detectadas são de nível 1, seguidas das anomalias de nível 2 (23,8%), das de nível 3 (21,1%) e, por fim, das de nível 4 (8,5%).

## 4 METODOLOGIA DE PREVISÃO DA VIDA ÚTIL PARA REVESTIMENTOS CERÂMICOS ADERENTES

### 4.1 Modelo numérico de previsão da vida útil

O modelo de previsão da vida útil proposto baseia-se nos modelos desenvolvidos que utilizam o indicador severidade da degradação, adaptado ao caso específico dos revestimentos cerâmicos aderentes. Definiu-se assim um índice numérico, designado de severidade da degradação do revestimento cerâmico ( $S_{w,c}$ ) que permite fornecer uma estimativa da degradação global do

revestimento através dos dados recolhidos no trabalho de campo. Este índice é obtido através da razão entre a área degradada ponderada e uma área de referência, equivalente à totalidade da fachada degradada com o maior nível de gravidade possível, tal como indicado na expressão:

$$S_{w,c} = \frac{\sum(A_i \times k_n \times k_{a,n})}{A \times \sum(k_{máx.})} \quad (1)$$

Onde,

$A_i$  - área do revestimento afectada por dada anomalia, em  $m^2$ ;

$k_n$  - factor multiplicativo das anomalias  $n$ , em função do seu nível de degradação (varia entre 0 e 4);

$k_{a,n}$  - coeficiente de ponderação correspondente ao peso relativo da anomalia detectada;

$A$  - área total do revestimento, em  $m^2$ ;

$\sum(k_{máx.})$  - somatório das constantes de ponderação correspondentes aos níveis de condição mais elevada da degradação de um revestimento de área  $A$  - somatório que toma o valor 14, tal como exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação do somatório dos níveis das constantes de ponderação correspondentes aos níveis de condição mais elevada

Anomalias	Níveis de condição				
	Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
	Níveis de ponderação				
	0	0,02	0,2	2	4
Visuais	×	×	×	⊗	
Fendilhação	×	×	×	×	⊗
Deterioração das juntas	×	×	×	×	⊗
Descolamento	×		×	×	⊗

⊗ - Nível de condição mais elevada para cada anomalia; o somatório dos níveis das constantes de ponderação correspondentes aos níveis de condição mais elevada é igual a 14 (2 + 4 + 4 + 4 correspondente às anomalias visuais, de fendilhação, de deterioração das juntas e descollamento respectivamente)

### 4.2 Ponderação relativa entre anomalias

As anomalias que ocorrem nos revestimentos cerâmicos ao longo da sua vida útil não possuem todas a mesma gravidade. Por exemplo, o descollamento de elementos cerâmicos do revestimento constitui uma situação muito grave

não podendo ser equiparada a anomalias como a alteração da cor. De facto, considera-se fundamental proceder à ponderação relativa entre os diferentes grupos de anomalias; esta ponderação foi realizada com base nos custos de reparação associados a cada grupo de anomalias (Tabela 3).

Após uma análise detalhada, onde foram conferidos os valores da severidade da degradação obtidos para cada ponto, constatou-se que esta ponderação permite avaliar com maior exactidão o estado de degradação dos revestimentos. Apresenta-se na Tabela 4 uma análise estatística dos resultados obtidos para a severidade da degradação com e sem ponderação relativa entre anomalias. Numa análise sucinta, verificou-se que os valores de severidade da degradação sem ponderação apresentam um valor de desvio-padrão de 0,095, os valores com ponderação apresentam apenas 0,075, ou seja, com uma menor dispersão de valores em relação à média do que os valores obtidos sem ponderação. O coeficiente de determinação fornece uma indicação da relação entre a severidade da degradação e a idade dos revestimentos; apesar de se ter obtido valores relativamente baixos, o coeficiente é ligeiramente superior no caso da severidade da degradação com ponderação relativa entre anomalias.

Tabela 4 - Análise estatística dos resultados obtidos para a severidade da degradação com e sem ponderação relativa entre anomalias

Elementos estatísticos	Severidade da degradação sem ponderação relativa entre anomalias	Severidade da degradação com ponderação relativa entre anomalias
Média	6,90%	4,46%
Erro-padrão	0,85%	0,69%
Mediana	1,33%	0,99%
Moda	0,00%	0,00%
Desvio-padrão	9,24%	7,51%
Variância da amostra	0,85%	0,56%
Mínimo	0,00%	0,00%
Máximo	33,03%	33,86%
R	0,5524	0,6534
R <sup>2</sup>	0,3052	0,4269
R <sup>2</sup> ajustado	0,2930	0,4169
Erro-padrão	0,0777	0,0574
F	25,0360	42,4610
F <sub>crítico</sub>	9,69626E-10	1,65444E-14
Expressão da curva de regressão	Y = 3,37E-05x <sup>2</sup> +0,00088x+0,00164	Y = 8,4E-05x <sup>2</sup> -0,0027x+0,0244

De facto, a ponderação relativa entre anomalias retira importância a anomalias que estariam sobrevalorizadas sem ponderação; um exemplo disso são as anomalias visuais, que ocorrem de forma generalizada em todas as fases da vida dos revestimentos cerâmicos e que não se consideram condicionantes, por si só, para estabelecer o fim da vida útil dos mesmos; assim sendo, quando se procede à ponderação, os valores de severidade da degradação reduzem-se significativamente, sendo essa redução mais notória em revestimentos recentes, que possuem, na grande generalidade dos casos, uma predominância das anomalias visuais face às restantes.

### 4.3 Curvas de degradação

A evolução da degradação é o comportamento demonstrado por um elemento ao longo da sua vida útil e exprime o progresso da perda da capacidade do material de responder aos requisitos exigidos. Esta perda de desempenho é representada graficamente por curvas de degradação às quais, geralmente, estão associados mecanismos de degradação específicos [36] [37]. Teoricamente, através do traçado da curva de degradação de um elemento construtivo, é possível determinar a sua vida útil prevista, com base na definição de um nível máximo de degradação.

Neste estudo, a curva de degradação dos 117 casos de estudo foi obtida através de uma regressão linear, onde se ajusta uma linha polinomial de grau 2 à nuvem de pontos correspondente aos casos estudados no trabalho de campo. Este tipo de degradação corresponde à ocorrência de fenómenos físicos e químicos cuja acção se faz sentir inicialmente de forma lenta com um potencial de degradação crescente ao longo do tempo; nestes casos, quanto maior for a degradação, maior a probabilidade desta aumentar e a um ritmo superior [36]. Este padrão de degradação é considerado o que melhor traduz os fenómenos de deterioração dos materiais, quando não existem anomalias prematuras e quando estes são sujeitos a uma manutenção corrente [15].

No entanto, da análise da curva de degradação, constatou-se que os resultados obtidos são pouco relevantes estatisticamente (Fig. 3). De facto, verificou-se uma grande dispersão de resultados (R<sup>2</sup> igual a 0,415) tendo-se verificado ainda que existem casos que, com a mesma idade, apresentam uma grande amplitude de valores de

severidade da degradação (Tabela 5). O facto de  $R^2$  ser igual a 0,415 demonstra que só 41,5% da variância da severidade da degradação pode ser explicada pelo modelo, devendo-se os restantes 58,5% a factores externos. No entanto, o desvio-padrão da amostra é muito baixo (0,071).

Considerou-se assim pertinente proceder ao traçado da curva de degradação utilizando os valores médios da severidade da degradação para cada idade (Fig. 4).

De facto, utilizando uma linha de regressão potencial, obteve-se uma melhoria significativa na correlação entre a nuvem de pontos e a curva de degradação ( $R^2$  igual a 0,742). Neste caso, o desvio-padrão obtido foi de 0,074, ou seja, semelhante ao obtido para a globalidade da amostra.

Tabela 5 - Amplitude dos resultados da severidade da degradação

Idade dos revestimentos inspeccionados	Amplitude da severidade da degradação
25 anos	]0,2%; 18,7%[
28 anos	]0,1%; 18,2%[
36 anos	]0,3%; 11,7%[
41 anos	]0,5%; 11,0%[
43 anos	]0,2%; 22,9%[

Através de uma análise ponto a ponto, foi possível constatar que o índice severidade da degradação descreve convenientemente a realidade observada. Impõe-se assim perceber o motivo pelo qual se obteve uma dispersão dos resultados tão acentuada. De facto, verificou-se que revestimentos situados na mesma rua e, portanto, expostos às mesmas condições ambientais apresentam valores tão díspares como no exemplo apresentado na Tabela 6. Considera-se que estas diferenças na degradação dos revestimentos se devem a factores como as condições de projecto, de execução e da própria inadequação dos materiais.

Muitas vezes, neste tipo de modelação, onde se representa graficamente a perda de desempenho ao longo do tempo, é possível definir bandas de variação superiores e inferiores correspondentes às situações de melhor ou pior desempenho. O método proposto por Meyer et al. [38] distingue três curvas de deterioração: uma superior ( $L_{máx.}$ ) para elementos em condições favoráveis (elemento de boa qualidade, protegido face a acções ambientais, manutenção periódica, entre outros); uma média ( $L_0$ ) para condições normais; e uma

inferior ( $L_{mín.}$ ) para condições desfavoráveis [37]. Procedeu-se assim ao traçado destas três curvas no caso concreto dos revestimentos cerâmicos (Fig. 5), para averiguar se seria possível definir padrões distintos de degradação. Por uma questão de clareza, os casos considerados na curva limite superior são aqueles cujo valor da severidade da degradação é superior ao valor correspondente à curva média (neste caso, 58 casos situam-se acima da curva média e 59 abaixo, o que corresponde a uma distribuição equilibrada dos 117 casos da amostra). Os casos correspondentes à curva limite inferior possuem idades entre 20 e 50 anos e a sua relevância estatística é muito reduzida. Por sua vez, a curva limite superior abrange toda a gama de idades da amostra e apresenta um coeficiente de correlação suficientemente relevante ( $R^2$  igual a 0,811).

Apesar de se poder verificar que entre os revestimentos cerâmicos inspeccionados existem casos com ritmos de degradação mais ou menos acelerados, não foi de facto possível averiguar a razão dessa diferença. Analisando as condições de exposição, não foi possível definir um padrão que justifique as diferentes curvas. Considera-se, assim, que estes resultados só podem ser justificados por parâmetros que, por falta de informação disponível, não foram analisados durante a realização do trabalho de campo, tais como as condições de projecto, de execução e características dos materiais utilizados.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objectivo do trabalho de campo foi inspeccionar visualmente revestimentos cerâmicos aderentes em fachadas, para recolher informação relativa à degradação dos edifícios em condições reais de serviço. O âmbito do trabalho de campo era assim avaliar o estado de degradação dos revestimentos no momento da inspecção não tendo sido avaliadas as condições de projecto ou de execução e as próprias características dos ladrilhos cerâmicos; de facto, depois de colocados no local, torna-se difícil identificar, na maioria dos casos, se as anomalias detectadas nos revestimentos se devem a erros nas fases iniciais do processo construtivo (concepção e execução).

Apesar de os efeitos ambientais serem geralmente reconhecidos como uma das principais causas de degradação dos revestimentos cerâmicos aderentes [39], outros autores apontam os erros de

projecto e de aplicação como as principais causas de aparecimento de anomalias [40] [41]. Por vezes, é difícil correlacionar uma anomalia existente nos revestimentos cerâmicos aderentes com o erro de execução que lhe deu origem [1]. No entanto, é unanimemente aceite que a soma de vários erros construtivos conduz a uma precoce situação patológica [42]. Por exemplo, o descolamento deve-se a inúmeras causas, entre as quais se destacam: a ausência de juntas de dilatação, o preenchimento deficiente do tardo do ladrilho e a inadequada especificação da argamassa adesiva [43]. A durabilidade dos revestimentos cerâmicos encontra-se também fortemente dependente da correcta execução das juntas do revestimento; Shohet et al. [44] referem que a vida útil de um revestimento cerâmico aderente pode ser 3 ou 4 vezes inferior ao esperado, quando as juntas não são devidamente concebidas.

A selecção dos materiais cerâmicos é feita, na maioria dos casos, apenas com base em critérios estéticos. No entanto, existem diversas características associadas ao próprio material cerâmico que influem no seu desempenho ao longo do tempo. As principais são o grau de vitrificação, a expansão por humidade, a dilatação térmica e a absorção de água. De facto, o conhecimento da absorção de água dos materiais cerâmicos é fundamental para uma especificação adequada dos materiais de assentamento, dado que o nível de porosidade vai influenciar as características de aderência [45].

Durante a realização do trabalho de campo assente apenas em inspecções visuais, não é possível identificar / avaliar estas características / propriedades; dado não ser esse o âmbito do trabalho de campo, a informação relativa às características dos ladrilhos cerâmicos não é fácil de obter; verifica-se, muitas vezes, que existe uma omissão destas características nos projectos entregues às autoridades licenciadoras e uma lacuna em algumas fichas técnicas de marcas que comercializam estes materiais.

## 6 CONCLUSÕES

Alguns autores defendem a necessidade de desenvolver, no sector da construção, ferramentas simples e de fácil utilização que permitam a tomada de decisão relativamente a acções de manutenção do parque edificado [46] [47]. A metodologia proposta no presente texto pretende

dar resposta a esta necessidade e tem como objectivo o estudo da durabilidade de elementos não estruturais da construção. A aplicação desta metodologia foi já comprovada para outros tipos de revestimento mas conduziu a valores pouco atractivos no caso dos revestimentos cerâmicos aderentes, podendo assim concluir-se a necessidade de aprofundar este estudo futuramente.

Os resultados obtidos permitiram concluir que não é possível modelar com rigor a degradação dos revestimentos cerâmicos aderentes apenas através de uma relação entre a severidade da degradação e a idade. De facto, constatou-se que existe uma elevada discrepância de valores da severidade da degradação em revestimentos sujeitos à mesma exposição ambiental e com a mesma idade. Tal pode justificar-se pela extrema susceptibilidade dos revestimentos cerâmicos aderentes face às condições de projecto e de execução e à selecção dos materiais, que conduzem à ocorrência precoce de anomalias, alterando assim a natural evolução da degradação deste tipo de revestimentos.

No caso dos revestimentos cerâmicos aderentes, revelou-se insuficiente a definição do estado de degradação dos revestimentos com base apenas em inspecções visuais; de facto, considera-se que a utilização de meios de diagnóstico auxiliares, com recurso a métodos não destrutivos, permitiria apurar com maior exactidão as anomalias presentes nos revestimentos.

Este estudo corresponde assim a uma primeira tentativa de estabelecer um modelo de previsão da vida útil dos revestimentos cerâmicos aderente, sendo necessário, que em estudos futuros se modele a degradação deste tipo de revestimentos com base nestas três condições: condições de projecto e de execução e selecção dos materiais.

## REFERÊNCIAS

- [1]Silvestre J., de Brito Jorge. *Ceramic tiling inspection system*. Construction and Building Materials 2009, 23 (2): 653-668.
- [2]Bovea María D., Díaz-Albo Elena, Gallardo Antonio, Colomer Francisco J., Serrano Julio. *Environment performance of ceramic tiles: Improvement proposals*. Materials & Design 2010, 31 (1): 35-41.
- [3]Mansur A. A. P., Nascimento O. L., Mansur H. S. *Data collection of five years of exterior facade pathologies in Brazil*. IX World

- Congress of Ceramic Tile Quality, QUALICER 2006, Castellon, Spain: PBB107-PBB120.
- [4]Wetzel A., Zurbriggen R., Herwegh M. *Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles*. Cement & Concrete Composites 2010, 32 (5): 327:338.
- [5]Wan W. C. *Tiling failures - a chronic problem re-visited*. VIII World Congress on Ceramic Tile Quality, QUALICER 2004, Castellon, Spain: PGII49-PGII56.
- [6]Shohet I., Laufer A. *Exterior cladding methods: a techno economic analysis*. Journal of Construction Engineering and Management 1996, 122 (3): 242-247.
- [7]Hovde P. *Factor methods for service life prediction*. CIB W080 / RILEM 175 SLM: Service Life Methodologies Prediction of service life for Buildings and Components, Task Group: Performance based methods of service life prediction 2004; Trondheim, Norway: 1-51.
- [8]Radhi H. *On the optimal selection of wall cladding system to reduce direct and indirect CO2 emissions*. Energy 2010; 35 (3): 1412-1424.
- [9]Gaspar P. *Metodologia para o cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes*. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002.
- [10]Rudbeck C. *Service life of building envelope components: making it operational in economical assessment*. Construction and Buildings Materials 2002; 16 (2): pp. 83-89.
- [11]Moser K. *Engineering design methods for service life prediction*. CIB W080 / RILEM 175 SLM: Service Life Methodologies Prediction of service life for Buildings and Components, Task Group: Performance based methods of service life prediction 2004; Trondheim, Norway: 52-95.
- [12]Lacasse M. A., Sjöström Christer. *Recent advances in methods for service life prediction of buildings materials and components - an overview*. CIB World Building Congress 2004, Toronto, Canada: 1-10.
- [13]Cecconi F. *Performance leads the way to service life prediction*. 9<sup>th</sup> DBMC International Conference on Durability on Building Materials and Components 2002; Brisbane, Australia: paper 213.
- [14]Daniotti B. *Durability evaluation and control to prevent building pathologies*. 2nd International Symposium on Pathology, Durability and Rehabilitation of Buildings LNEC 2003; Lisbon, Portugal: 97-105.
- [15]Gaspar P. *Vida útil das construções: desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa da durabilidade de elementos da construção. Aplicação a rebocos de edifícios correntes*. Tese de Doutoramento em Ciências da Engenharia, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2009.
- [16]Shohet I., Putterman M., Gilboa E. *Deterioration patterns of building cladding components for maintenance management*. Construction Management and Economics 2002; 20 (4): 305-314.
- [17]Gaspar P., de Brito J. *Quantifying environment effects on cement-rendered facades: a comparison between different degradation indicators*. Building and Environment 2008; 43 (11): 1818-1828.
- [18]Silva A. *Previsão da vida útil de revestimentos de pedra natural de paredes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2009.
- [19]Chew M. Y. L. *Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding*. Construction and Building Materials 1999; 13 (5): 293-296.
- [20]Flores-Colen I., de Brito J., Freitas V. P. *Condition assessment of facade rendering though in situ testing*. 11<sup>th</sup> DBMC International Conference on Durability on Building Materials and Components 2008; Istanbul, Turkey: paper T71.
- [21]Campante E., Paschoal J. *Durability of facades with ceramic coverings - Why they fail*. 9<sup>th</sup> DBMC International Conference on Durability on Building Materials and Components 2002; Brisbane, Australia: paper 60.
- [22]Sabbatini F, Barros M. *Recomendações para a produção de revestimentos cerâmicos para paredes de vedação em alvenaria*. Relatório Técnico R6-06/90, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 1990, São Paulo, Brasil.
- [23]Timellini G., Palmonari C. *Ceramic floor and wall tile performance and controversies*. EdiCer, Sassuolo, Italy, 1989.
- [24]Padilha M., Ayres G., Lira R., Jorge D., Meira

- G. *Levantamento quantitativo das anomalias em revestimentos cerâmicos em fachadas de edificações verticais na cidade de João Pessoa*. II Congresso de Pesquisa e Inovação de Rede Norte/Nordeste de Educação Tecnológica 2007, João Pessoa, Brasil.
- [25] Silvestre J., de Brito J. *Statistical analysis of defects of tiles' joints/ Análisis estadístico de los defectos de juntas cerámicas*. Materiales de Construcción, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja 2007, Madrid, Spain: 57 (285): 85-92.
- [26] Lo Y. *Delamination of external wall finishes of housing*. XXX IAHS World congress on housing - housing construction - an interdisciplinary task 2002, FCTUC, Coimbra, Portugal: 1571-1576.
- [27] Marteinson B., Jónsson B. *Overall survey of buildings - performance and maintenance*. 8<sup>th</sup> DBMC, International Conference on the Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1634-1654.
- [28] Florentzou F., Brandt E., Wetzel C. *MEDIC - A method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets*. Energy and Buildings 2000; 31 (2): 167-170.
- [29] Brandt E., Rasmussen M. *Assessment of building conditions*. Energy and Buildings 2002; 34 (2): 121-125.
- [30] Shohet I., Paciuk M. *Service life prediction of exterior cladding components under standard conditions*. Construction Management and Economics 2004; 22 (10): 1081-1090.
- [31] Balaras A., Droutsa K., Dascalaki E., Kontoyiannidis S. *Deterioration of European apartment buildings*. Energy and Buildings 2005; 37 (5): 515-527.
- [32] Chew M. *Defect analysis in wet areas of buildings*. Construction and Building Materials 2005; 19 (3): 165-173.
- [33] Kirkham R. J., Boussabaine H. *Forecasting the residual service life of NHS hospital buildings: a stochastic approach*. Construction Management and Economics 2005; 53 (1-2): 1-17.
- [34] Van Winden C., Dekker R. *Rationalization of building maintenance by Markov decision models: a pilot case study*. Operation Research Society 1998; 49 (9): 928-935.
- [35] Tuutti, K. *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Report No. CBI Research FO 4:82, Stockholm, 1982.
- [36] Shohet I., Rosenfeld Y., Puterman M., Gilboa E. *Deterioration patterns for maintenance management - a methodological approach*. 8<sup>th</sup> DBMC, Conference on Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1666-1678.
- [37] Florentzou F., Brandt E., Wetzel C. *MEDIC - a method for predicting residual service life and refurbishment investment budgets*. 8<sup>th</sup> DBMC, International Conference on the Durability of Building Materials and Components 1999; Ottawa, Canada: 1280-1288.
- [38] Meyer Paul, Büchler Max, Christen Kurt, Waibel, Andres. *Vieillissement des éléments de construction et coûts d'entretien*. Swiss Federal Office for Economic Policy, Program PI BAT 1995, Zurich, Swiss.
- [39] Yiu C. Y., Ho D. C. W., Lo S. M. *Weathering effects on external wall tiling systems*. Construction and Buildings Materials 2007; 21 (3): 594-600.
- [40] Gómez C. *Ceramic tiling pathologies*. VIII World Congress on Ceramic Tile Quality, QUALICER 2004, Castellon, Spain: PD03-PD10
- [41] Just A., Franco L. *Descoloramento dos revestimentos ceramicos de fachada na cidade do Recife*. Boletim Técnico N.º 285 do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil; 2001.
- [42] Guan Will L., Alum J., Zhao Z. Y., Zhang W. L., Liu Z. J. *Impact of workmanship on performance of tiled-wall systems*. Performance of Constructed Facilities 1997; 11 (2): 82-89.
- [43] Medeiros J. *Why does facade tiling fail?*. VI World Congress of Ceramic Tile Quality, QUALICER 2000, Castellon, Spain: 147-156
- [44] Shohet I., Paciuk M., Puterman M. *Deterioration patterns of exterior cladding components*. CIB/W87 2003, Lisbon, Portugal: 151-160.
- [45] Ribeiro F. *Especificações de juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios: Levantamento do estado da arte*. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2006.

- [46] Bower B. *Simple minds, smart choices*.  
Science News 1999; 155 (22):348:350.
- [47] Tolman F., Tolman A. *Optimization and  
decision-making in sustainable construction  
and operation*. 2ILCDES 2003: 123-129.

## ANEXO

Tabela 1 - Níveis de degradação propostos para os revestimentos cerâmicos aderentes

Níveis de condição	Níveis de ponderação	Caracterização das anomalias		% área de RCA afectada
<b>Nível 0</b> ( $S_{w,rp} \leq 1\%$ )	<b>0</b>	Não apresenta degradação visível		-
<b>Nível 1 Bom</b> ( $1\% < S_{w,rp} \leq 6\%$ )	<b>0,02</b>	Anomalias visuais ou de degradação da superfície	Sujidade superficial	-
			Pequenas crateras à superfície	≤ 10%
			Desgaste ou riscagem	
			Esmagamento ou lascagem dos bordos	
Alteração de brilho e/ou cor				
Fendilhação	Manchas de humidade	-		
	Fendilhação do vidro <sup>(*)</sup>			
Deterioração das juntas	Fenda c/ direcção marcada (< 0,2 mm) <sup>(1)</sup> s/ infiltração <sup>(*)</sup>	-		
<b>Nível 2 Degradação ligeira</b> ( $6\% < S_{w,rp} \leq 20\%$ )	<b>0,2</b>	Anomalias visuais ou de degradação da superfície	Enodoamento ou alteração de cor	-
			Pequenas crateras à superfície	> 10% e ≤ 50%
			Desgaste ou riscagem	
			Esmagamento ou lascagem dos bordos	
			Alteração de brilho e/ou cor	
			Manchas de humidade	
		Fendilhação	Crescimento biológico	
			Graffiti	
			Eflorescências	
			Fendilhação sem direcção preponderante <sup>(*)</sup>	
Deterioração das juntas	Fenda c/ direcção marcada (> 0,2 mm) <sup>(2)</sup> s/ infiltração <sup>(*)</sup>	≤ 30%		
	Sem perda de material nas juntas <sup>(*)</sup>	≤ 30%		
Descolamento	Com perda de material nas juntas <sup>(*)</sup>	≤ 10%		
	Perda de aderência	≤ 20%		
<b>Nível 3 Degradação moderada</b> ( $20\% < S_{w,rp} \leq 50\%$ )	<b>2,0</b>	Anomalias visuais ou de degradação da superfície	Empolamento	≤ 20%
			Pequenas crateras à superfície	> 50%
			Desgaste ou riscagem	
			Esmagamento ou lascagem dos bordos	
			Alteração de brilho e/ou cor	
			Manchas de humidade	
		Fendilhação	Crescimento biológico	
			Graffiti	
			Eflorescências	
			Fendilhação sem direcção preponderante <sup>(*)</sup>	
Deterioração das juntas	Fenda c/ direcção marcada (> 1 mm) <sup>(3)</sup> s/ infiltração <sup>(*)</sup>	> 30% e ≤ 50%		
	Sem perda de material nas juntas <sup>(*)</sup>	> 30% e ≤ 50%		
Descolamento	Com perda de material nas juntas <sup>(*)</sup>	> 10% e ≤ 30%		
	Perda de aderência	> 20%		
<b>Nível 4 Degradação generalizada</b> ( $S_{w,rp} \geq 50\%$ )	<b>4,0</b>	Descolamento	Empolamento	> 20%
			Destacamento localizado	≤ 10%
			Destacamento generalizado	> 10%

(\*) Com infiltração - aumento de um nível de degradação.

(1) Fenda, detectável a uma distância maior do que 5 metros apenas com o recurso a binóculos.

(2) Linha tênue, facilmente detectável a uma distância maior do que 5 metros, com o recurso a binóculos.

(3) Fenda bem definida e visível a uma distância superior a 5 metros, sem recurso a binóculos.

(4) Fenda caracterizada por uma linha grossa em que, é possível, com o recurso a binóculos, a uma distância superior a 5 metros, identificar uma clara separação dos bordos.

Tabela 3 - Parâmetros que influenciam a estimação dos coeficientes de ponderação

Anomalias	Critérios de desempenho Exigências		Possibilidade de originar novas anomalias	Operação de reparação (custo em €/m <sup>2</sup> )	Razão entre o custo de reparação e o custo de construído de novo <sup>(*)</sup>	Coeficiente de ponderação k <sub>a,n</sub>
	Segurança	Estanqueidade				
Visuais	○○	●○	●○	Limpeza (13,09 €/m <sup>2</sup> )	18%	0,18
Fendilhação	●●	●●	●●	A reparação da fendilhação nos revestimentos cerâmicos aderentes pode envolver reparações que vão desde a colmatação superficial até à substituição dos ladrilhos afectados	100%	1,0
Em juntas	Degradação do material de colmatação			Reparação de juntas (23,4 €/m <sup>2</sup> )	32%	0,32
	Perda de material de colmatação	●○	●○	A substituição do material das juntas em revestimentos cerâmicos aderentes acarreta alguns riscos, podendo conduzir, em último caso, à substituição dos ladrilhos cerâmicos envolventes	100%	1,0
Descolamento	●●	●●	●●	A substituição dos ladrilhos cerâmicos envolve sempre custos que facilmente igualam o custo da execução do revestimento novo, podendo mesmo atingir valores superiores devido à remoção do revestimento degradado	120%	1,2

○○ - Sem correlação; ●○ - correlação provável; ●● - elevada correlação

(\*) - Os custos de execução de um revestimento vertical exterior em ladrilhos cerâmicos variam substancialmente consoante os custos de cada ladrilho. Admitindo um revestimento executado com ladrilhos cerâmicos de grés de 40 x 40 cm que custa 19 €/m<sup>2</sup>, os custos de execução rondam 72,57 €/m<sup>2</sup>

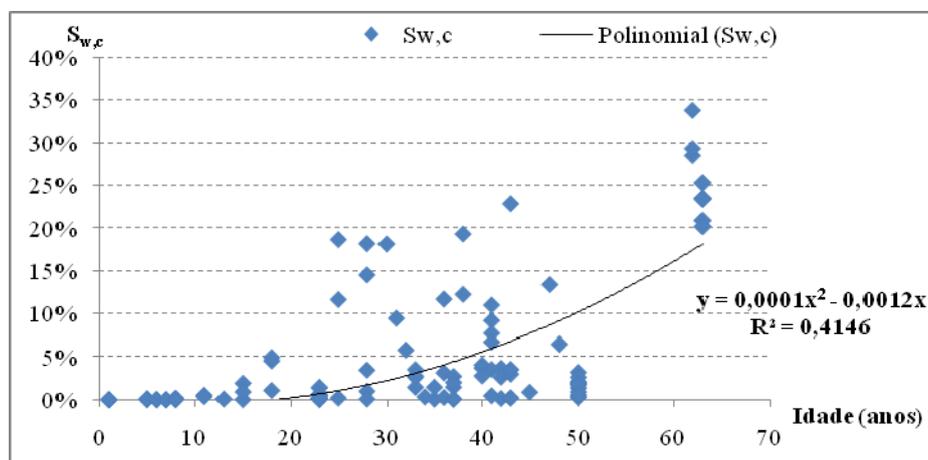


Fig. 3 - Evolução da degradação para o indicador severidade da degradação de 117 revestimentos cerâmicos aderentes inspeccionados

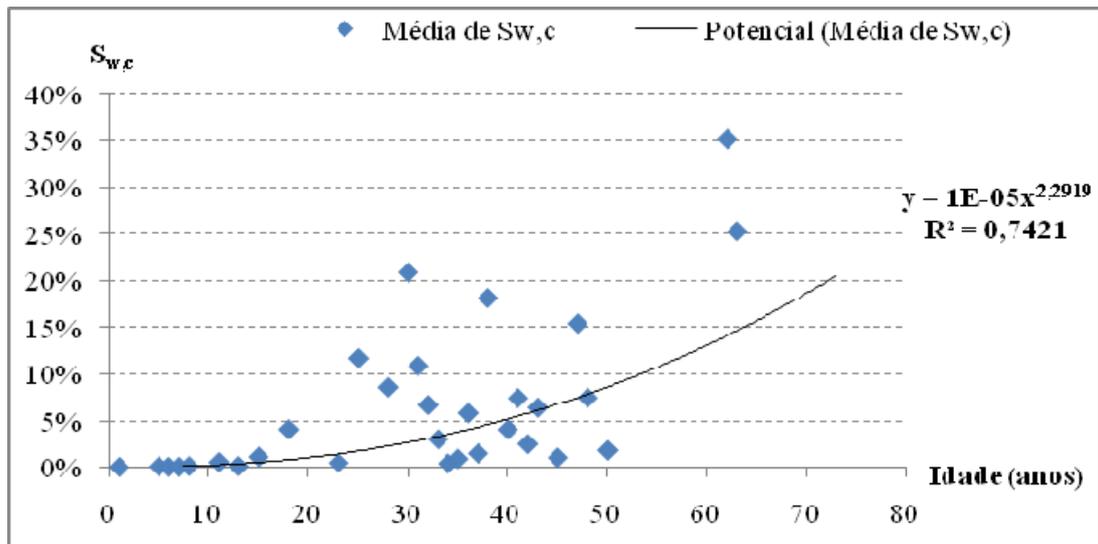


Fig. 4 - Evolução da degradação para a média dos valores da severidade da degradação para cada idade

Tabela 6 - Exemplo de dois revestimentos com a mesma idade e sujeitos às mesmas condições ambientais mas com valores de severidade da degradação muito distintos

Caso de estudo	Caracterização das anomalias	Severidade da degradação
	<p>10 % da área do revestimento cerâmico afectada por eflorescências</p> <p>40 % da área do revestimento cerâmico afectada por fendilhação sem direcção preponderante</p> <p>40% da área do revestimento cerâmico afectada por fenda com direcção marcada (&gt; 0,2 mm) sem infiltração</p> <p>20% da área do revestimento cerâmico afectada por enodoamento ou alteração da cor das juntas</p> <p>10% da área do revestimento cerâmico afectada por degradação do material das juntas (sem perda de material)</p> <p>10% da área do revestimento cerâmico afectada por degradação do material das juntas (com perda de material)</p> <p>1% 10% da área do revestimento cerâmico afectada por empolamento</p>	<b>18,2%</b> (Nível 2)
	<p>50% da área do revestimento cerâmico afectada por enodoamento ou alteração da cor das juntas</p> <p>1% da área do revestimento cerâmico afectada por destacamento localizado</p>	<b>0,2%</b> (Nível 0)

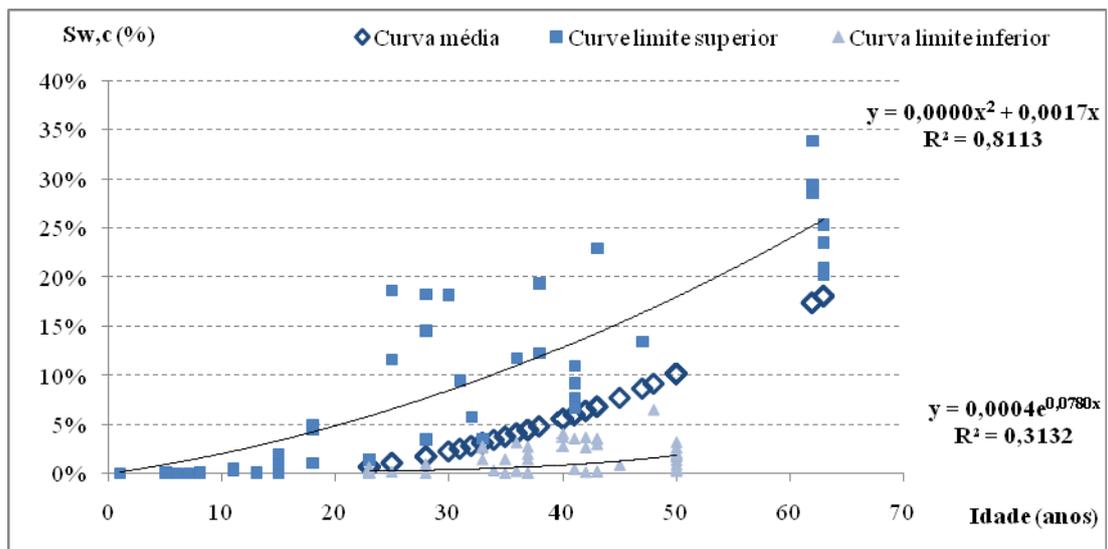


Fig. 5 - Curvas de degradação correspondentes a diferentes padrões de degradação