

Reparação de Fendas em Elementos Construtivos de Betão Armado

Caso de Estudo: Reparação de Túnel em Betão Armado

David de Almeida Araújo

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia
Engenheiro João António Crisóstomo Farinha

Júri

Presidente: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Orientador: Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Vogal: Professora Doutora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Mai de 2016

Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Ramôa Correia, por toda a disponibilidade e amizade ao longo tanto destes meses da dissertação, como das cadeiras que me leccionou. Pela forma motivante com que sempre orientou o meu trabalho e pela prontidão na resposta a todas as dúvidas que surgiram.

À HTecnic, em particular ao Eng.º João Farinha pela oportunidade de integrar a empresa e pela abertura para visitar a obra de reparação de um túnel em betão armado, e pela prontidão para a resolução de alguns problemas que foram surgindo. Ao Eng.º Nuno Cerqueira pela ajuda em todo o processo. À Eng.ª Alexandra Batista e ao Eng.º António Domingues pelo acompanhamento nas suas frentes de obra, pela disponibilidade para a realização, no estaleiro de obra, de ensaios dos produtos utilizados, por todas as dúvidas esclarecidas e conhecimentos que me transmitiram.

Aos fornecedores e representantes das marcas de produtos e equipamentos de injeção, Paulo Portugal (MAPEI), Pedro Sousa (SIKA), Nicolau Giovanetti (Pires&Giovanetti) e à BASF pela rápida e eficiente resposta às questões colocadas e por todos os documentos fornecidos.

Aos meus colegas, e grandes amigos, António Rebello de Andrade, Lopo Salgado, Jaime Olazabal, Martim Mello, Luís Mello e Pedro Abreu, que me acompanharam ao longo de todo o curso, pela amizade e companheirismo durante todos estes anos. Aos meus colegas e amigos, Martim Eiró pela amizade, companhia de estudo nos últimos anos e por toda a ajuda na formatação deste documento, e Carolina Figueiredo, companheira de estudo durante os anos de curso e de trabalho ao longo da dissertação, por toda a motivação.

À Sara Ruivo pela importante ajuda na revisão dos textos em inglês.

A Nossa Senhora de Fátima que me ajudou a levantar nas etapas mais difíceis ao longo de todo o curso.

Por último mas não menos importantes,

À minha família por toda a confiança que sempre depositaram em mim. Aos meus pais agradeço toda a compreensão e paciência e o permanente incentivo nos momentos mais difíceis. Aos meus avós a força que sempre me deram com o seu exemplo de vida.

À Catarina por todo o apoio ao longo dos últimos três anos. Por estar sempre presente nos bons e maus momentos, pelos conselhos, constante incentivo e motivação, por toda a força que me transmitiu, e pela muito importante ajuda na revisão de todos os textos da dissertação.

Resumo

Presentemente, diversas estruturas de betão armado apresentam anomalias devido às mais diversas causas, sendo frequente a ocorrência de fendilhação excessiva. Este problema pode afectar apenas a aparência ou a funcionalidade dos elementos em betão ou, pelo contrário, indicar problemas estruturais e/ou de durabilidade significativos, daí ser relevante a sua reparação.

Actualmente, a utilização de resinas, nomeadamente epoxídicas, por injeção ou apenas por enchimento superficial (selagem), constitui a solução mais frequente para a reparação de fendas, por ser uma solução expedita, económica e eficaz. Contudo, os produtos à base de resinas epoxídicas, sendo rígidos, não são a solução mais adequada para fendas activas, bem como para fendas com humidade, visto não aderirem a superfícies na presença de água. Para tal, o uso de produtos de injeção à base de resinas de poliuretano e resinas acrílicas constitui a solução mais indicada.

Não obstante a recente publicação da norma EN1504 (*Produtos e Sistemas para Protecção e Reparação de Estruturas de Betão*), a informação sobre injeções para reparação de fissuras em betão armado encontra-se dispersa. Tendo em conta esta limitação, o objectivo da presente dissertação é desenvolver um documento que sintetize toda a informação acerca dos materiais, equipamentos, técnicas e procedimentos construtivos a utilizar na reparação de fendas em elementos de betão, com particular enfoque na tecnologia de injeção.

Neste documento começa-se por descrever sumariamente as principais anomalias em estruturas de betão armado e a respectiva metodologia de intervenção, sendo detalhada a fendilhação, as suas causas, as características das fendas e as técnicas de inspecção e monitorização das mesmas. Apresenta-se, de seguida, uma revisão da norma EN 1504, nomeadamente no que diz respeito aos requisitos de desempenho dos produtos utilizados na protecção e reparação de fendas e vazios por injeção em estruturas de betão e os métodos de ensaio e avaliação de conformidade dos produtos a utilizar. À luz desse enquadramento normativo, descrevem-se os materiais e os equipamentos utilizados nos sistemas de injeção de fendas, bem como os métodos e procedimentos mais adequados. Na parte final da dissertação, apresenta-se um caso de estudo sobre o acompanhamento de uma obra de reabilitação de um túnel, que envolveu a reparação de fendas em elementos de betão armado, recorrendo a diferentes técnicas e materiais.

Palavras-chave: betão; reparação; fendilhação; fendas; injeção; resinas; EN1504.

Abstract

Nowadays, several reinforced concrete structures contain anomalies due to different causes, with frequent occurrence of excessive cracking. This problem affects not only concrete elements appearance or functionality but can also indicate significant structural and/or durability problems, which makes the repair extremely relevant.

Currently, the use of resins, namely epoxy resins, by injection or only by surface filling (sealing) processes, is the most frequent solution for cracking repair, as it is the most prompt, economic and efficient resolution. However, epoxy products, being rigid, are not the most appropriate solution to active cracking, as well as for cracks with water presence, since they do not adhere to moist surfaces. For this purpose, the most suitable solution is the use of polyurethane or acrylic resins injection.

Despite the recent publication of EN1504 (*Products and systems for the protection and repair of concrete structures*), the information about injection systems for cracking repair in reinforced concrete structures is often disperse. Given this constraint, this document's purpose is to develop a document about all materials, equipment, methods and construction processes to use in reinforced concrete structures cracking repair, with particular emphasis on injection technology.

In the first place, the main anomalies in reinforced concrete structures and the action methodology are briefly described, emphasizing the cracking problem (causes, cracks characteristics, and inspection and monitoring techniques). Then, a review of EN1504 is presented, in particular as regards the injection products performance requirements, test methods and conformity assessment. Under this normative framework, the materials and the equipment used in injection systems are described, as well as the most appropriate methods and procedures. In the end, a case study is presented, that includes a case study of a rehabilitation work in a concrete tunnel that involved cracking repair in reinforced concrete elements, using different techniques and materials.

Keywords: concrete; repair; cracking; cracks; injection; resins; EN1504.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Índice de figuras	ix
Lista de tabelas	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e objectivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Organização do documento	3
2 Fendilhação em Elementos de Betão Armado.....	5
2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Anomalias em estruturas de betão e metodologias de intervenção	5
2.2.1 Principais anomalias em estruturas de betão armado	6
2.2.2 Fases de intervenção numa estrutura de betão armado	8
2.3 Fendilhação do betão	10
2.3.1 Causas das fendas em betão.....	11
2.3.2 Caracterização das fendas em betão.....	13
2.3.3 Técnicas de inspecção e monitorização de fendas em betão	16
2.4 Considerações finais	20
3 Enquadramento Normativo	21
3.1 Considerações iniciais.....	21
3.2 Requisitos de desempenho	22
3.2.1 Metodologias, sistemas e produtos de reparação	22
3.2.2 Características de desempenho dos produtos de injeção	24
3.2.3 Classificação dos produtos de injeção	29
3.3 Avaliação de conformidade	33
3.3.1 Requisitos de identificação.....	33
3.3.2 Controlo da produção em fábrica	35
3.4 Considerações finais	35
4 Tecnologia da Reparação de Fendas por Injeção	37
4.1 Considerações iniciais.....	37
4.2 Técnicas de reparação.....	38
4.2.1 Injeção	38
4.2.2 Selagem	39
4.2.3 Revestimento superficial	39
4.3 Sistemas de injeção.....	40
4.3.1 Sistemas rígidos	40

4.3.2	Sistemas flexíveis.....	40
4.4	Caracterização geral dos materiais para produtos de injeção	41
4.4.1	Materiais resinosos.....	42
4.4.2	Materiais cimentícios	49
4.5	Equipamentos de injeção	51
4.5.1	Bombas de injeção	51
4.5.2	Bicos de injeção.....	56
4.6	Métodos de injeção.....	57
4.6.1	Injeção sob pressão directamente na fenda	58
4.6.2	Injeção sob pressão através de furos feitos com brocas	58
4.7	Procedimentos e controlo de qualidade da injeção.....	59
4.7.1	Procedimento de injeção	59
4.7.2	Controlo de qualidade da injeção	63
4.8	Considerações finais – Tabela síntese	64
5	Caso de Estudo – Reparação de Túnel em Betão Armado	67
5.1	Considerações iniciais.....	67
5.2	Caracterização geral da obra	67
5.2.1	Patologia.....	68
5.2.2	Condicionantes.....	69
5.3	Metodologia de intervenção e soluções de reparação.....	70
5.3.1	Soluções de reparação de fendas por injeção	71
5.3.2	Outros trabalhos de reparação.....	76
5.4	Considerações finais	81
6	Conclusões	83
6.1	Considerações finais	83
6.2	Perspectivas de desenvolvimentos futuros	86
	Referências bibliográficas	88
	ANEXO A.....	93
	ANEXO B.....	94
	ANEXO C	95
	ANEXO D	96
	ANEXO E.....	97

Índice de figuras

Figura 1 - Principais causas e mecanismos da deterioração do betão armado (adaptado de [5])	6
Figura 2 - Fendilhação de pilar de uma ponte devido a deformações excessivas impostas pelo tabuleiro [6].....	7
Figura 3 - Descasque de elemento em betão armado devido à corrosão das armaduras [6].....	8
Figura 4 - Fendilhação em "craquelet" de muro em betão armado devido a reacção alcális-silica [8].....	8
Figura 5 - Origem da fendilhação em função da causa (adaptado de [11])	10
Figura 6 - Fissuras devidas à retracção plástica na lâmina de compressão de uma laje aligeirada [12].....	11
Figura 7 - Esquema de fendilhação associada a flexão circular [12].....	14
Figura 8 - Esquema de fendilhação por flexão simples com esforço transversal [16]	14
Figura 10 - Esquema de fendilhação associada à compressão simples [12].....	14
Figura 9 - Esquema de fendilhação associada à torção [12].....	14
Figura 11 - Esquema de fendilhação por tracção simples [12].....	15
Figura 12 - Fendilhação associada ao esforço transversal [12]	15
Figura 13 - Fendas superficiais [15].....	15
Figura 14 - Fenda profunda [15].....	15
Figura 15 - Comparador de fendas [18].....	17
Figura 16 - Lupa de fendas [18]	17
Figura 17 - Métodos expeditos de monitorização da actividade das fendas [19]	18
Figura 18 - Fissurómetro [18].....	18
Figura 19 - Ensaio de ultra-sons - métodos de disposição dos transdutores (adaptado de [18])	19
Figura 20 - Técnicas de diagnóstico para a avaliação da fendilhação - parâmetros avaliados (adaptado de [4])	19
Figura 21 - Principais razões para a reparação de fendas (adaptado de [15])	37
Figura 22 - Selagem de fenda (adaptado de [15])	39
Figura 23 - Revestimento superficial de fenda (adaptado de [15])	39
Figura 24 - Resina de espuma de poliuretano após expansão (sem confinamento) [35]	46
Figura 25 - Injecção de resina acrílica em cortina de impermeabilização [15]	48
Figura 27 - Pistola de injecção manual [15].....	52
Figura 26 - Bomba de injecção manual [15]	52
Figura 28 - Bomba eléctrica monocomponente comum para injecção de resinas [15].....	53
Figura 29 - Bomba eléctrica monocomponente de "pequena dimensão" para injecção de resinas [15].....	53
Figura 30 - Bomba eléctrica monocomponente para injecção de grouts [15]	53
Figura 32 - "Cabeça" do misturador coloidal [15].....	53
Figura 31 - Misturador coloidal [15].....	53

Figura 34 - Bomba para injeção de produtos acrílicos de 2 componentes [15].....	54
Figura 33 - Mistura dos dois componentes de um produto de injeção - Bomba bicomponente (adaptado de [15])	54
Figura 35 - Injetor de superfície [15]	56
Figura 36 - Injetor mecânico comum para injeção de resinas [15].....	56
Figura 37 - Injetor mecânico para injeção de resinas recomendado para altas pressões e altos fluxos de material a injectar [15].....	56
Figura 38 - Injetor mecânico com cabeça em plástico para injeção de microcimentos [15] ...	56
Figura 39 - Injeção com injectores de superfície (adaptado de [32])	58
Figura 40 - Injeção com injectores mecânicos (adaptado de [32])	59
Figura 42 - Fissura selada pronta para injeção com injectores de superfície [15].....	60
Figura 41 - Aplicação dos injectores de superfície em função da espessura da peça de betão [15].....	60
Figura 43 - Furação para aplicação de injectores mecânicos em função da espessura da peça de betão [15].....	62
Figura 44 - Aplicação e aperto dos injectores mecânicos [15]	62
Figura 45 - Injeção de resina de espuma de poliuretano com injectores mecânicos [15]	62
Figura 46 - Carotes cilíndricas extraídas de estrutura de betão fendilhada [6]	63
Figura 47 - Diagnóstico de zonas ocas no betão (imagem fornecida pela HTecnic)	68
Figura 48 - Limpeza da superfície do betão com jacto de água (imagem fornecida pela HTecnic)	71
Figura 49 - Colocação dos injectores após furação (fotografia fornecida pela HTecnic)	72
Figura 50 - Selagem superficial de fissura seca com argamassa epoxídica (fotografia fornecida pela HTecnic)	73
Figura 51 - Injeção de resina de poliuretano (fotografia fornecida pela HTecnic)	75
Figura 52 - Trabalhos de marcação para corte das superfícies a tratar (imagem fornecida pela HTecnic)	77
Figura 53 - Picagem do betão com martelo pneumático ligeiro (imagem fornecida pela HTecnic)	78
Figura 54 - Área de reparação após tratamento e limpeza da superfície (fotografia fornecida pela HTecnic)	78
Figura 55 - Zona a reparar com armaduras tratadas (fotografia fornecida pela HTecnic)	79
Figura 56 - Armaduras protegidas com inibidor de corrosão (fotografia fornecida pela HTecnic)	79
Figura 57 - Reparação do betão com argamassa tixotrópica (fotografia fornecida pela HTecnic)	80
Figura 58 - Banda elástica aplicada sobre junta de dilatação	81

Lista de tabelas

Tabela 1 - Princípio de actuação para protecção e reparação das estruturas de betão (adaptado de [28])	23
Tabela 2 - Princípios e métodos de reparação associados ao tratamento de fendas (adaptado de [5])	24
Tabela 3 - Produtos de injeção para enchimento transmissor de forças das fissuras (F) (adaptado de [13])	27
Tabela 4 - Produtos de injeção para enchimento dúctil das fissuras (D) (adaptado de [13]) ...	28
Tabela 5 - Produtos de injeção para enchimento expansivo das fissuras (S) (adaptado de [13])	28
Tabela 6 - Requisitos de desempenho para produtos de injeção para enchimento transmissores de forças das fissuras (F) (adaptado de [13])	30
Tabela 7 - Requisitos de desempenho para produtos de injeção para enchimento dúctil das fissuras (D) (adaptado de [13])	31
Tabela 8 - Requisitos de desempenho para produtos de injeção para enchimento expansivo das fissuras (S) (adaptado de [13])	32
Tabela 9 - Requisitos de identificação para produtos de injeção formulados com ligante hidráulico (H) (adaptado de [13])	33
Tabela 10 - Requisitos de identificação para produtos de injeção formulados com ligante polimérico reactivo (P) (adaptado de [13])	34
Tabela 11 - Propriedades de produtos comuns à base de resinas epoxídicas	44
Tabela 12 - Propriedades de produtos comuns à base de resinas de PU	47
Tabela 13 - Propriedades de produtos comuns à base de resinas de gel acrílico	48
Tabela 14 - Materiais a utilizar nos sistemas de injeção em função da humidade da fenda a ser preenchida	50
Tabela 15 - Características técnicas comuns das bombas monocomponentes eléctricas	54
Tabela 16 - Características técnicas comuns de bombas bicomponentes para injeção de produtos acrílicos	55
Tabela 17 - Tipos de utilização mais comuns das diversas bombas em função dos diferentes produtos de injeção (adaptado de [31])	55
Tabela 18 - Casos comuns para a utilização dos sistemas de injeção à base de resinas (adaptado de [31])	65
Tabela 19 - Materiais a injectar em função das características das fendas	85
Tabela 20 - Correspondência entre documentos normativos europeus e nacionais (adaptado de [13])	95
Tabela 21 - Princípios e métodos para a protecção e reparação de estruturas de betão (adaptado de [5])	96
Tabela 22 - Produtos de resinas epoxídicas para injeção de fissuras com propriedades semelhantes à Tabela 11	97
Tabela 23 - Produtos de espumas de poliuretano para injeção de fissuras	97

Tabela 24 - Produtos de resinas de gel de PU para injeção de fissuras com propriedades semelhantes à Tabela 12	98
Tabela 25 - Produtos de resinas de gel acrílico para injeção de fissuras com propriedades semelhantes à Tabela 13	98
Tabela 26 - Produtos de microcimentos para injeção de fissuras	98

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O betão armado é o material estrutural mais utilizado actualmente, pois é económico, durável, atinge elevadas resistências mecânicas e tem a vantagem de poder ser moldado em qualquer forma. O desenvolvimento do betão como material de construção remonta há milhares de anos, enquanto o aço foi introduzido para reforçar o betão [1], tendo a partir de essa altura evoluído para o betão armado como é conhecido actualmente.

Embora a maioria das estruturas de betão apresente um desempenho satisfatório, existem problemas em muitas das estruturas, frequentemente manifestados por fendilhação excessiva, devido às mais variadas causas. Estas causas podem afectar unicamente a aparência do betão ou indicar problemas estruturais e/ou de durabilidade significativos [2].

Um bom estado de conservação melhora a funcionalidade e o desempenho de uma estrutura de betão, garantindo a resistência e rigidez, a boa aparência da superfície, melhorando a impermeabilidade e a estanqueidade à entrada de humidade e a agentes agressivos para o betão e o aço, aumentando os padrões de durabilidade [1]. Assim, é crucial a inspecção e o diagnóstico periódicos das estruturas, durante a sua vida útil, e a respectiva intervenção, quando necessária, recorrendo a soluções de reparação eficazes.

Recentemente, deram-se muitos avanços na tecnologia e nos materiais utilizados na reparação do betão armado para intervir nas mais diversas anomalias. Este trabalho incide na reparação de fendas, que afectam frequentemente as estruturas de betão, principalmente a sua durabilidade e funcionalidade, podendo também conduzir ou resultar de problemas estruturais. O método em foco para a reparação das fendas é a injeção de resinas, sendo feita referência também à injeção de materiais cimentícios (microcimentos) com a mesma finalidade. A injeção de resinas no ramo da construção civil tem facilitado muito a intervenção na fendilhação do betão, pois proporciona trabalhos expeditos, económicos e eficientes na colmatação de fendas. As características físicas e químicas das resinas beneficiam os modos de aplicação na construção e têm vindo a ter uma contribuição importante para o desenvolvimento da reparação do betão e a apresentar resultados muito satisfatórios.

Ao longo dos anos tem-se recorrido a diversos sistemas de reparação de fendas, sendo os produtos à base de cimento e de polímeros os mais utilizados [3]. Mais recentemente, entre os métodos de reparação de fendas, o uso de resinas epoxídicas, quer por injeção ou apenas por enchimento superficial (selagem), tem sido o mais comum [2]. Contudo, por si só, os produtos à base de resinas epoxídicas não são capazes de resolver todos os casos de fendilhação do betão, nomeadamente em suportes húmidos ou com amplitudes significativas de movimentos, daí ter havido um avanço na tecnologia de injeção e materiais utilizados, surgindo as resinas de poliuretano e as resinas acrílicas.

1.2 Motivação e objectivos

Actualmente, devido à conjuntura económica e à idade já avançada de muitas estruturas, algumas com naturais anomalias bem patentes, a tendência actual na construção civil passa muito mais pela reabilitação de estruturas existentes, ao invés do foco na construção nova. A reparação de betão tem evoluído bastante ao longo dos anos, em grande parte devido à norma europeia EN1504 (*Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão*), que cobre uma vasta gama de soluções de reparação para as diversas anomalias das estruturas.

Sendo a fendilhação a anomalia mais comum e a injeção de fendas o método de intervenção mais económico e eficaz para a sua reparação, é importante a existência de um documento que sintetize a informação mais relevante acerca do tema. De facto, não obstante a publicação da norma EN1504, a informação sobre injeções para reparação de fissuras em betão armado encontra-se muito dispersa.

Uma vez identificada esta dispersão de informação, o principal objectivo foi desenvolver um documento “guia”, expedito e com utilidade prática, quanto à injeção para reparação de fendas. Para tal (i) apresentam-se as principais anomalias em estruturas de betão armado e a respectiva metodologia de intervenção; (ii) descreve-se a fendilhação em elementos de betão, identificando-se as suas causas e as características das fendas, bem como as técnicas de inspecção e monitorização das mesmas; (iii) analisam-se os critérios normativos europeus (EN1504) quanto à reparação de estruturas de betão armado, mais concretamente em relação à injeção de fendas e vazios, sendo analisados os requisitos de desempenho e os critérios de avaliação de conformidade dos produtos; e (iv) caracterizam-se os materiais e equipamentos mais comuns para sistemas de injeção de fendas, bem como os métodos e procedimentos mais adequados, sendo por fim feita uma análise das alternativas existentes para a reabilitação de estruturas em betão armado com problemas de fendilhação.

1.3 Metodologia

A metodologia seguida na presente dissertação caracterizou-se por uma pesquisa teórica conciliada por abordagens práticas. Para a elaboração deste trabalho, recorreu-se a pesquisa bibliográfica, através de livros, artigos científicos, publicações em revistas e conferências, dissertações de mestrado e teses de doutoramento.

Além da pesquisa teórica, ao longo deste trabalho, acompanhou-se uma empreitada de reparação de um túnel em betão armado, como caso de estudo, onde o principal foco incidiu sobre a reparação de fendas recorrendo a sistemas de injeção. Esta fase foi realizada através de visitas técnicas à obra a fim de verificar, na prática, as teorias aqui expostas e contactar com os directores de obra, encarregados e fiscalização.

Foram ainda analisados catálogos e fichas técnicas de produtos e equipamentos para injeção de fendas em estruturas de betão, de diversas marcas, e foram contactados os respectivos fornecedores de modo a esclarecer informação não disponível publicamente.

1.4 Organização do documento

A dissertação está estruturada em seis capítulos, que se organizam da seguinte forma:

- 1 Introdução** - No primeiro capítulo, é feito um enquadramento acerca do tema da dissertação, são delineados os objectivos e a metodologia seguida e apresenta-se a estrutura do documento.
- 2 Fendilhação em elementos de betão armado** - No segundo capítulo, apresenta-se uma síntese das principais anomalias em betão armado e respectiva metodologia de intervenção, sendo aprofundada a fendilhação em elementos de betão, identificando-se as causas mais comuns e as características mais relevantes das fendas.
- 3 Enquadramento normativo** - No terceiro capítulo, analisa-se a norma europeia EN1504 (*Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão*), que abrange todos os aspectos relacionados com a reparação do betão. Este capítulo incide nos requisitos de desempenho dos produtos utilizados na protecção e reparação de fendas e vazios por injeção em estruturas de betão, bem como nos métodos de ensaio e na avaliação da conformidade dos produtos a utilizar.

- 4 Tecnologia da reparação de fendas por injeção** - O quarto capítulo diz respeito à tecnologia de reparação de fendas por injeção e aos respectivos objectivos da intervenção. Neste capítulo descrevem-se os sistemas de injeção com recurso a produtos à base de resinas e materiais cimentícios, sendo os primeiros os mais detalhados.

- 5 Caso de estudo – Reparação de túnel em betão armado** - No quinto capítulo descreve-se a obra de reparação de um túnel em betão armado, cuja principal anomalia se enquadra no tema em foco na dissertação, a fendilhação, bem como as soluções de reparação utilizadas (injecções de resinas).

- 6 Conclusões e desenvolvimentos futuros** - No sexto e último capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e indicadas sugestões para eventuais desenvolvimentos futuros.

2 Fendilhação em Elementos de Betão Armado

2.1 Considerações iniciais

As construções, em geral, estão sujeitas à acção de diversos agentes de degradação, como a água, as variações de temperatura, a presença de sais solúveis, a poluição, a biodeterioração, entre outros [4].

O betão armado está sujeito a alterações ao longo do tempo, em função de interações entre os elementos que o constituem (cimento, agregados, água, adjuvantes e aço) e agentes externos, como a água, os sais, os gases e os micro-organismos. Muitas vezes, dessas interações resultam anomalias que podem comprometer o desempenho da estrutura, acelerar a degradação da construção, provocar efeitos estéticos indesejáveis ou causar desconforto nos utilizadores.

Os elementos construtivos podem ainda sofrer anomalias provocadas por erros humanos nas diferentes fases da construção - concepção, projecto, execução e utilização [4].

Neste capítulo apresenta-se inicialmente uma síntese das principais anomalias em estruturas de betão armado, fazendo-se referência às metodologias de intervenção e reparação deste tipo de elementos. De seguida, aborda-se com maior detalhe a anomalia que constitui o objecto da presente dissertação, a fendilhação.

2.2 Anomalias em estruturas de betão e metodologias de intervenção

No contexto da reabilitação de estruturas de betão com anomalias, a correcta abordagem para a intervenção deve iniciar-se na avaliação do tipo e do nível de deterioração dos elementos construtivos, bem como na identificação das suas causas, de modo a se poder proceder à correcta reparação e evitar a progressão das anomalias.

Apresenta-se, na Figura 1, um esquema, presente na norma Europeia EN1504-9 [5], que resume as principais causas e mecanismos de deterioração do betão e do betão armado. Estes mecanismos são descritos na presente secção.

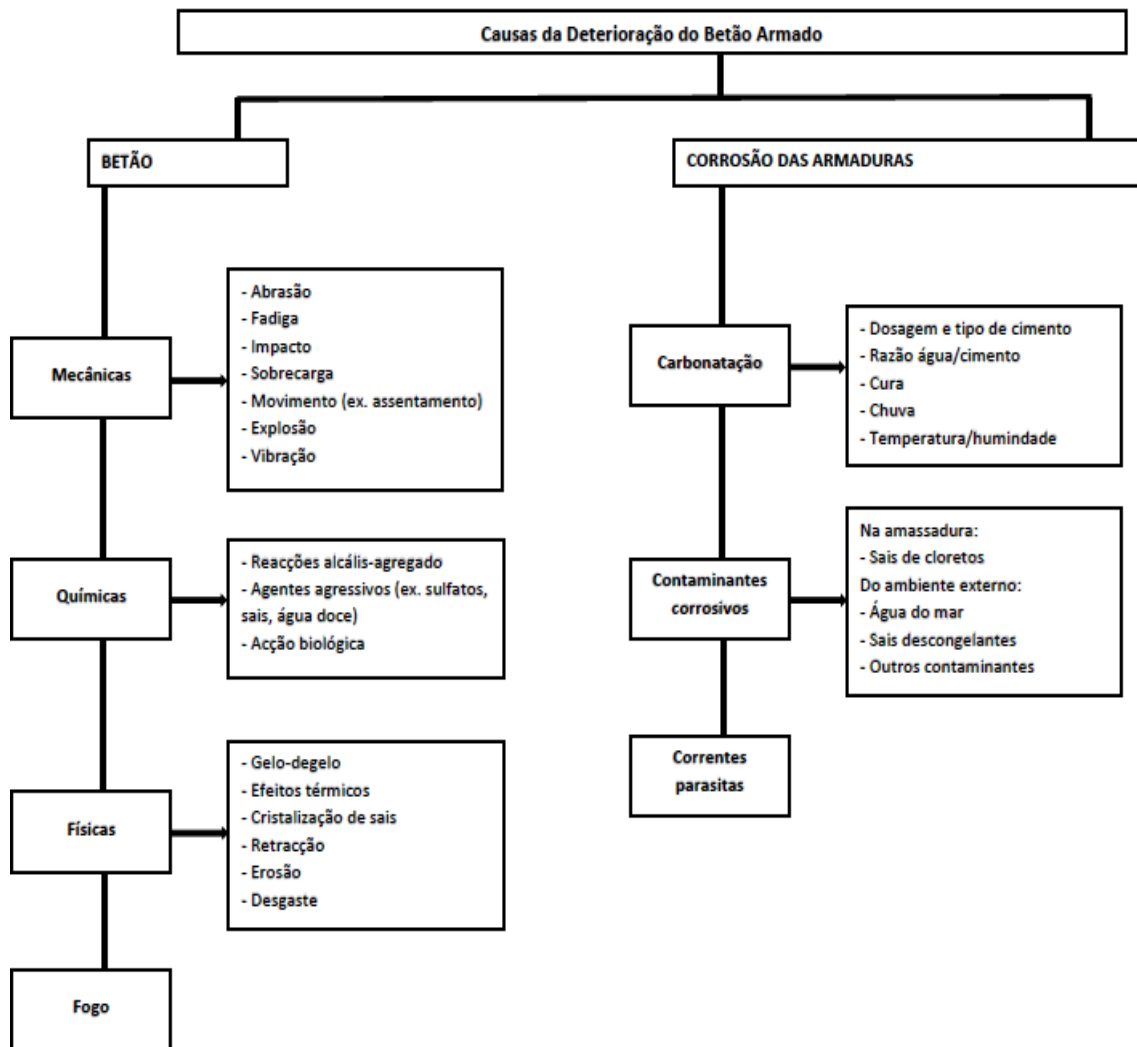


Figura 1 - Principais causas e mecanismos da deterioração do betão armado (adaptado de [5])

2.2.1 Principais anomalias em estruturas de betão armado

As principais causas das anomalias no betão diferenciam-se bastante no tempo de ocorrência. Neste capítulo, as anomalias encontram-se divididas em três grupos principais: anomalias decorrentes do **processo construtivo**, **anomalias estruturais** e **anomalias com origem na durabilidade** dos materiais (aço e betão) [6].

As anomalias com **origem no processo construtivo** podem surgir devido a diversas variáveis. O facto de o betão ser moldado e colocado em obra potencia a ocorrência de enganos nos materiais ou defeitos na construção [6]. A incorrecta execução das cofragens e seu escoramento é um dos exemplos de causas de anomalias desse tipo, causando deformações nos elementos, erros de geometria na estrutura ou descontinuidades visíveis no betão já endurecido. A deficiente colocação e vibração do betão fresco (insuficiente ou em excesso) após betonagem poderá originar segregação dos agregados e, conseqüentemente, vazios no betão (“chochos”) e zonas porosas. Também o pouco rigoroso processo de cura poderá originar perda excessiva de água do betão fresco e sucessiva fendilhação indesejada, processo este que será aprofundado mais à frente na secção 2.3.1 *Causas das fissuras em betão*.

As **anomalias estruturais** traduzem-se normalmente pela fendilhação significativa, deformações elevadas ou esmagamento de elementos por carregamento excessivo. Como mostra a Figura 2, a fendilhação significativa pode surgir também após processos de deformação nos quais o movimento da peça está restringido [6].



Figura 2 - Fendilhação de pilar de uma ponte devido a deformações excessivas impostas pelo tabuleiro [6]

O betão armado degrada-se ao longo do tempo, sendo de esperar que as construções sofram um envelhecimento natural provocado quer pelas agressões do meio ambiente, quer pela sua utilização normal [6]. Verifica-se, frequentemente, uma deterioração precoce das construções em betão armado provocada por factores que afectam a **durabilidade dos materiais**, como a carbonatação, a penetração de cloretos, o ataque de sulfatos e as reacções alcális-agregado.

A carbonatação do betão e a penetração de cloretos, podem conduzir à despassivação das armaduras e conseqüente corrosão das mesmas. Este processo, por ser expansivo, leva à elevada concentração de tensões no betão e, conseqüentemente, fendilhação e descasque do betão (perda do betão de recobrimento) - Figura 3.

Os sulfatos (de sódio, magnésio ou cálcio provenientes de solos alcalinos ou águas subterrâneas [7]) atacam a matriz cimentícia do betão, criando uma espécie de gesso através de uma reacção altamente expansiva [6], que origina fendilhação ou mesmo a desagregação do betão.

As reacções alcális-agregado ocorrem devido à reacção de alguns dos compostos mineralógicos dos agregados (normalmente sílica reactiva) com hidróxidos alcalinos do cimento, a água de amassadura do betão e agentes externos, com a formação de um gel que envolve os agregados. A expansão deste gel quando exposto à humidade causa tracções no interior do betão, que originam fendas generalizadas (irregulares, tipo "craquelet" à volta dos agregados - Figura 4) e consequente diminuição das propriedades mecânicas do betão [6].



Figura 3 - Descasque de elemento em betão armado devido à corrosão das armaduras [6]



Figura 4 - Fendilhação em "craquelet" de muro em betão armado devido a reacção alcális-sílica [8]

2.2.2 Fases de intervenção numa estrutura de betão armado

Os tipos de acções referidos anteriormente podem ocorrer de forma isolada, mas, em muitos casos, é comum ocorrerem combinações de acções com origens distintas, o que dificulta o diagnóstico. Para a correcta identificação das causas e consequente reparação é essencial uma abordagem correcta para a intervenção.

De um modo geral, a abordagem para a intervenção numa estrutura de betão armado deve ser feita em três fases encadeadas, começando pela avaliação do estado da estrutura, seguida da definição da metodologia de intervenção e, por fim, a reparação da estrutura [9].

2.2.2.1 Avaliação do estado da estrutura

A avaliação do estado da estrutura tem como finalidade identificar as anomalias e respectivas causas, avaliar o estado de deterioração, prever a evolução da deterioração, avaliar o nível da segurança da estrutura e avaliar a necessidade de intervenção em termos temporais, isto é, se a necessidade de intervenção é imediata ou não.

Segundo Costa [9], deve ser realizado o seguinte conjunto de acções para a correcta avaliação do estado da estrutura:

- 1) Recolha de informação (projecto, fase de execução, fase de utilização);
- 2) Inspeção visual;
- 3) Inspeção detalhada;
- 4) Avaliação do estado de deterioração;
- 5) Avaliação da segurança.

A inspeção visual e detalhada são técnicas de diagnóstico que serão detalhadas na secção 2.3.3 *Técnicas de inspeção e monitorização de fissuras em betão*, do presente capítulo.

2.2.2.2 Definição da metodologia de intervenção

Como enunciado anteriormente, após a avaliação do estado da estrutura de betão armado, seguem-se as fases de definição da metodologia de intervenção mais adequada e a execução da reparação.

A definição da metodologia de intervenção deverá ter em consideração o tipo e o nível de deterioração, a importância da deterioração para a durabilidade e funcionalidade do elemento e da estrutura e a utilização da estrutura. Os custos da possível intervenção e a eventual manutenção associada à mesma são também factores que devem ser tidos em conta [9].

2.2.2.3 Reparação da estrutura

Após a avaliação do estado da estrutura e da análise das possíveis metodologias de intervenção, há que proceder à tomada de decisão tendo em consideração as seguintes opções [9]:

- Adiamento da reparação e intervenção em fase posterior, sendo necessária uma avaliação detalhada da capacidade de carga da estrutura para garantir que esta funciona em segurança até ser intervencionada;
- Substituição de elementos estruturais;
- Demolição da estrutura;
- **Reparação da estrutura**, que permite eliminar as anomalias e prevenir a evolução da deterioração.

A definição dos métodos de reparação deve ter por base os seguintes aspectos: tipo de utilização e período de vida da estrutura, requisitos de desempenho estrutural, manutenção prevista para a estrutura, possibilidade de execução de operações de reparação futuras, aplicabilidade das técnicas de reparação à anomalia em causa e custos associados à reparação e manutenção [16].

Para proceder à reparação da estrutura, os métodos equacionados devem satisfazer requisitos chave, tais como serem eficientes na reparação da anomalia, serem exequíveis em função das condições existentes, eliminarem/combaterem as causas que originaram a anomalia, serem adequados ao nível de exposição da estrutura a agentes agressivos e, também, garantirem a existência de produtos e/ou sistemas em conformidade com a norma EN1504 [10].

2.3 Fendilhação do betão

A fendilhação é uma manifestação patológica que pode ocorrer no betão em estado fresco ou no estado já endurecido de uma estrutura ou elemento de betão. Na Figura 5 apresenta-se um esquema que sistematiza os mecanismos de fissuração e as suas causas, antes e após a presa do betão. Estes mecanismos são descritos na presente secção.

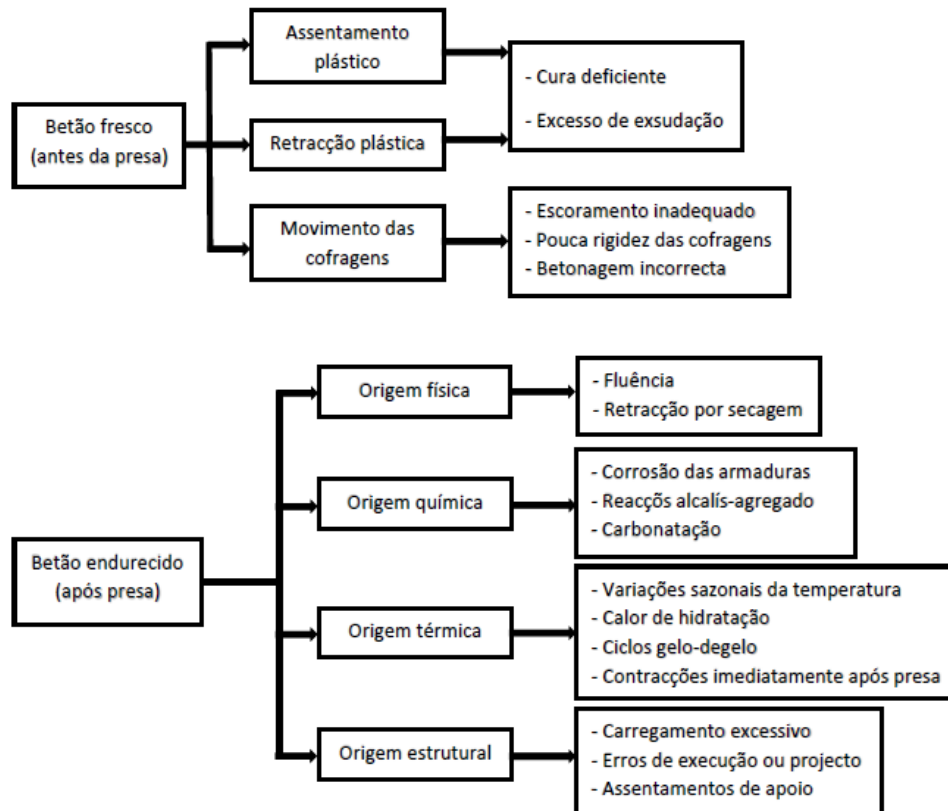


Figura 5 - Origem da fendilhação em função da causa (adaptado de [11])

Tal como referido anteriormente, as fendas são anomalias muito frequentes nas estruturas de betão e com causas muito variadas. Antes de serem reparadas, deve ser estudada a sua posição em relação à peça estrutural, a abertura, a direcção, a profundidade, a humidade, entre outros aspectos que dão indicações das causas prováveis. As fendas são também ocorrências inerentes ao betão armado, visto que as secções são usualmente dimensionadas para estados de secção fendilhada e, portanto, não constituem sempre uma manifestação patológica. Sob esse aspecto, a diferenciação entre manifestação patológica ou não é feita em função das características das fendas (nomeadamente da sua abertura) e das suas causas.

As causas e características da fendilhação, bem como as técnicas de inspecção e diagnóstico, serão abordadas no seguimento deste capítulo. Os materiais, equipamentos e métodos a adoptar na reparação de fissuras serão também abordados em detalhe nos capítulos seguintes.

2.3.1 Causas das fendas em betão

A correcta avaliação das causas é crucial visto que o aspecto e o desenvolvimento das fissuras depende das acções que as causam. Contudo, a identificação das causas a partir dos seus efeitos é uma tarefa complexa, quer pela dificuldade em estabelecer relações entre ambos, quer pela coexistência de diversos pares causa-efeito que, por vezes, se condicionam mutuamente e se confundem.

A fendilhação pode ter origem (i) em processos internos/químicos do betão, como a retracção plástica, o assentamento plástico, reacções expansivas ou variações térmicas, (ii) em factores externos, como assentamentos, cargas excessivas ou vibrações, (iii) em erros de projecto e/ou de execução e (iv) em agentes exteriores, como a inadequada utilização da estrutura, factores atmosféricos que causem ou acelerem processos de deterioração, entre outros [11]. Em seguida, explicam-se alguns dos processos mais comuns e já referidos que contribuem para a fendilhação do betão.

Quanto aos **processos internos** do betão, que podem originar fendilhação, destacam-se os seguintes:

- Retracção plástica – as fendas ocorrem no betão em idade jovem, quando a velocidade de perda de água por evaporação é superior à velocidade com que a água chega à superfície por exsudação. Estas fendas devidas à retração plástica têm tendência para surgir em peças esbeltas muito expostas à temperatura exterior (Figura 6) [12].



Figura 6 - Fissuras devidas à retracção plástica na lâmina de compressão de uma laje aligeirada [12]

- Assentamento plástico – as fendas surgem devido à migração da água para a superfície exterior do betão, que faz com que o volume do betão diminua e se dê um assentamento do betão fresco [11].
- Reacções expansivas (corrosão das armaduras, ataques dos álcalis ou ataque de sulfatos) – causam concentrações de tensões no interior do betão que levam à fendilhação.
- Variações térmicas – de entre os vários processos internos do betão, quanto às variações térmicas, salienta-se o **calor de hidratação do cimento** - reacção exotérmica que se traduz em tensões internas que causam fendilhação no betão.

Quanto aos **factores externos**, já referidos, destacam-se os seguintes:

- Assentamentos de apoio – o deslocamento relativo dos apoios devido, normalmente, a assentamentos do terreno de fundação, pode causar fendilhação ou deformação de elementos, pois corresponde a alterações impostas à estrutura [6]. Quanto mais rígida for a estrutura, mais vulnerável será à fendilhação no caso de assentamentos diferenciais dos apoios.
- Efeito da temperatura – distribuições de temperaturas diferenciais numa estrutura (por exemplo, numa ponte ou viaduto em que uma face está exposta a radiação solar enquanto a face oposta se encontra protegida) provocam variação diferencial de volume dos seus elementos, e, em função das restrições de movimento causadas pelos apoios (rigidez da estrutura), surgem tensões mais ou menos significativas no interior da estrutura que causam a fendilhação do betão [6].
- Retracção a longo prazo – ocorre devido à diminuição do volume do betão por perda de água e é independente do carregamento da estrutura. O aspecto das fendas não é regular e depende da rigidez da estrutura (as tensões serão tanto maiores quanto mais rígida for a estrutura) e da quantidade de armaduras (reforço interno) [11].
- Fluência – estando submetido a carregamentos constantes ao longo do tempo, o betão tem tendência a sofrer aumento de deformação por fluência e, muitas vezes, fendilhação [6], tanto mais intensa quanto maiores forem as restrições da estrutura (apoios) a essas deformações.

2.3.2 Caracterização das fendas em betão

Para a correcta intervenção e reparação de uma anomalia, é necessária uma caracterização detalhada da mesma. No caso da fendilhação do betão, devem caracterizar-se as fendas de acordo com os factores que se consideram essenciais. São estes a actividade, a localização, a abertura, a extensão, a profundidade, a distribuição espacial, a presença de água, o alinhamento e o enchimento das fendas.

A primeira operação antes de reparar uma fissura é analisar a sua **actividade** [6]. A actividade ou oscilação da fissura é crucial para a caracterização do tipo de fissuras e causas associadas, bem como para a escolha das técnicas de intervenção para a reparação das mesmas (especificadas no *Capítulo 4 – Tecnologias da reparação de fendas por injecção*). Definem-se então as fendas em relação à sua actividade como [9]:

- Fendas activas – fendas que apresentam variação de abertura ao longo do tempo. As fendas activas podem ainda classificar-se quanto à oscilação como estáveis (ex. variações de temperatura diárias ou sazonais, causando dilatações e contracções nos materiais) ou instáveis (ex. assentamento em curso).
- Fendas passivas – fendas estabilizadas, que não apresentam movimento, isto é, em que não há variação da abertura ao longo do tempo. A causa que originou a fenda deixou de existir (ex. fissuras de retracção após estabilização deste processo).
- Fendas latentes – fendas passivas que podem tornar-se activas após a intervenção de reparação (ex. eliminação de juntas de dilatação).

Quanto à **localização** das fendas, devem considerar-se vários aspectos, tais como os seguintes:

- Perceber se a fenda se estende ao longo de um material ou, pelo contrário, se se desenvolve no limite entre materiais diferentes;
- Avaliar se as fendas afectam o elemento resistente ou se se limitam ao seu acabamento [11], não afectando, neste caso, o próprio betão.

A **abertura**, largura ou espessura da fenda, usualmente denominada por **w**, é uma das características mais relevantes das fendas. Segundo [12] distingue-se o tipo de fendas em função da sua largura máxima como (i) microfissuras, $w < 0.05$ mm; (ii) fissuras médias, $0.05 \text{ mm} \leq w \leq 0.4$ mm e (iii) microfissuras $w > 0.4$ mm.

As normas EN1504-5 [13] e EN1770 [14] consideram as seguintes classes de aberturas de fendas: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 e 0.8 mm. Estas classes são distinguidas em função da injectabilidade da fissura, assunto que será abordado no *Capítulo 3 – Enquadramento Normativo*.

Na prática, a abertura das fendas para a qual se intervém é uma opção tomada pelo dono de obra e/ou pelo projectista, mas é usual definirem-se fendas de abertura “normal” ou aceitável, com $w \leq 0.3/0.4$ mm que, geralmente, não são reparadas, e fissuras de abertura não aceitável, com $w > 0.5$ mm, cuja reparação por norma é necessária. Esta é uma abordagem algo simplista apenas para enquadrar uma gama de valores de abertura das fendas, pois há vários factores que irão afectar a decisão de reparação das fissuras, como a protecção contra a corrosão ou contra o ingresso de água, que dependerá de caso para caso.

A abertura terá também influência muito significativa no método de reparação da fenda e equipamento utilizado. Caso se opte pela injeção da fenda, a espessura é uma característica elementar para a escolha do material a injectar [15], como será detalhado no *Capítulo 4 – Tecnologias da Reparação de Fendas por Injecção*.

Entende-se como **distribuição espacial** a repetitividade das fendas, isto é, o registo do número, frequência e sequência de formação das fendas e a disposição das mesmas no elemento. Deve analisar-se se existe um padrão entre fendas, como fendas paralelas, que podem indicar que se trata de fendilhação por flexão simples (Figuras 7); elementos sujeitos a flexão e esforço transverso, que apresentam fendas relativamente paralelas nas zonas mais sujeitas à flexão e fendas com inclinação em direcção aos apoios em zonas onde as forças de corte têm mais expressão (Figura 8); fendas generalizadas irregulares devido a vibrações da estrutura; fendas de forma helicoidal com repetitividade ao longo de um elemento devido a acção de esforços de torção (Figuras 9); fendas devidas à compressão dos elementos (Figura 10); fendas em *craquelet* devido a reacções expansivas alcális-agregado (como explicado anteriormente na secção 2.2.1 *Principais anomalias em estruturas de betão armado*); ou mesmo fendas em certas zonas das estruturas por acção de esforços de tracção simples de elementos (Figura 11), neste caso paralelas entre si e a atravessar a totalidade da profundidade da secção.

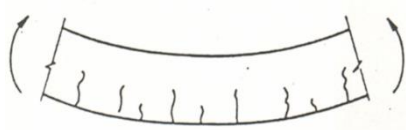


Figura 7 - Esquema de fendilhação associada a flexão circular [12]

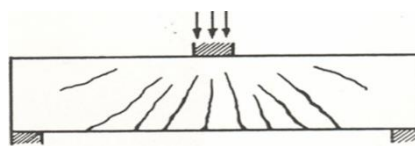


Figura 8 - Esquema de fendilhação por flexão simples com esforço transverso [16]

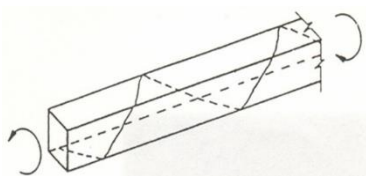


Figura 10 - Esquema de fendilhação associada à torção [12]

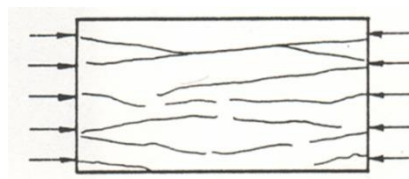


Figura 9 - Esquema de fendilhação associada à compressão simples [12]

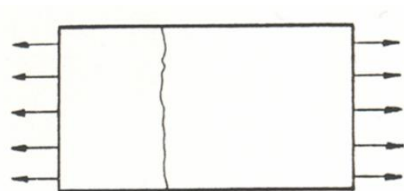


Figura 11 - Esquema de fendilhação por tração simples [12]

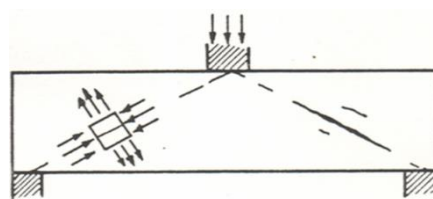


Figura 12 - Fendilhação associada ao esforço transverso [12]

Quanto à **profundidade**, é necessário distinguir entre fendas superficiais (Figura 13) e fendas profundas (Figura 14). Naturalmente, as fendas que se desenvolvem em profundidade são mais prejudiciais para os elementos, causando efeitos mais negativos na durabilidade, na resistência mecânica do betão e na impermeabilização da estrutura, enquanto as fissuras superficiais afectam essencialmente a durabilidade [15].



Figura 13 - Fendas superficiais [15]

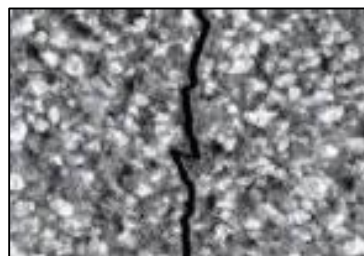


Figura 14 - Fenda profunda [15]

As fendas pouco profundas são normalmente causadas por retração plástica ou devido ao gradiente de temperaturas que aumenta com o calor de hidratação do betão e diminuição da temperatura exterior [11]. Estas fendas são geralmente de pequena abertura (inferior a 0.5 mm) e de comprimento limitado. Em relação à distribuição espacial, a sua disposição costuma ser aleatória e desenvolvem-se formando um ângulo de 45° a 60° com o eixo longitudinal do elemento [17].

As fendas profundas podem ter origem em fendas pouco profundas que se vão agravando ao longo do tempo se não forem sujeitas a intervenção, bem como devido a factores como reacções expansivas, assentamentos, cargas excessivas, entre outros referidos na secção 2.3.1 *Causas das fendas em betão*.

É ainda de grande importância avaliar as fendas quanto à **presença de água**, isto é, o conhecimento do estado de humidade da fenda, nomeadamente, se esta se encontra seca, húmida ou com água a percolar, com ou sem pressão. Tal influencia muita a escolha dos materiais e técnicas a adoptar na reparação das fissuras, como será discutido no *Capítulo 4 – Tecnologias da Reparação de Fendas por Injecção*.

Sintetiza-se então o estado das fendas em função da presença de água como fendas secas, fendas húmidas, fendas com infiltração, com ou sem pressão [15]. Distinguem-se fendas húmidas de fendas com infiltração sem pressão pelo facto de nestas existir fluxo de água.

Em relação à **extensão**, deve ser medida e anotada a dimensão da fenda de maneira a facilitar a inspecção seguinte (se for necessário) e avaliar se houve aumento do seu comprimento.

Deve também observar-se se os lados da fenda, separados pelo seu **alinhamento**, estão nivelados, dado que pode haver deslocamento de um dos lados do elemento em relação ao outro. As situações em que não há nivelamento estão geralmente associadas a efeitos decorrentes de variações térmicas indicando, por vezes, o deficiente funcionamento de juntas de dilatação. A observação do alinhamento pode permitir saber o tipo de força ou deslocamento que poderá ter originado a fenda.

Outro aspecto que se deve observar é o **enchimento** da fendas, em particular se esta encontra limpa ou com detritos no seu interior, permitindo avaliar se é uma fissura recente ou com alguma idade. Avaliando a quantidade de detritos no seu interior, bem como a sua origem e estado de deterioração, é possível estimar o desenvolvimento da fenda em termos temporais.

2.3.3 Técnicas de inspecção e monitorização de fendas em betão

Para o conhecimento do estado patológico dos materiais e estruturas, e conseqüente diagnóstico das suas anomalias, é necessário o recurso a diversas técnicas, quer *in situ*, quer laboratoriais. O método de inspecção escolhido para cada caso deve ser simultaneamente exequível, expedito, eficaz e capaz de produzir informação útil [11].

As técnicas de inspecção podem ser distinguidas quanto ao seu grau de destruição (destrutivas, parcialmente destrutivas, não destrutivas), aos princípios em que se baseiam, ao tipo de resultados que permitem obter, aos elementos ou materiais a que se aplicam, aos objectivos principais e ao tipo de tecnologia utilizada.

Esta dissertação apenas dará ênfase a técnicas úteis para a patologia em estudo, a fendilhação. Na presente secção, faz-se referência à importância de um diagnóstico e procura-se abordar e sistematizar algumas das técnicas existentes de diagnóstico de fendilhação: inspecção visual e inspecção detalhada.

Não é imperativo que uma fissura seja reparada logo que detectada. Pelo contrário, por vezes, é vantajoso observar o seu comportamento, diagnosticando as suas causas e características. Devem também ser diagnosticados os elementos estruturais e não estruturais adjacentes, os materiais e respectivas condições, bem como qualquer factor ambiente e nas proximidades da fissura que possa ter causado, agravado ou acelerado o seu desenvolvimento.

2.3.3.1 *Inspecção visual*

No diz respeito às fendas, a avaliação visual é muitas vezes suficiente para caracterizar o tipo de fendilhação. A caracterização das fendas é feita, como descrito anteriormente, de acordo com a sua localização, extensão, profundidade, largura, estado de degradação do elemento, entre outros.

A inspecção visual deve ser auxiliada por um *kit* portátil (muitas vezes chamado *kit* de campo), que pode incluir, entre outros equipamentos, lápis, marcadores, fita métrica, lanterna, binóculos, máquina fotográfica, comparador de fendas (Figura 15) e lupa de fendas (Figura 16).



Figura 15 - Comparador de fendas [18]



Figura 16 - Lupa de fendas [18]

2.3.3.2 *Inspecção detalhada*

Na inspecção detalhada, para além da inspecção visual corrente descrita anteriormente, recorre-se a técnicas *in situ* não destrutivas, de rápida execução e fáceis de aplicar.

Para a monitorização da actividade das fendas, existem métodos expeditos que podem ser aplicados facilmente no local e sem causar danos ao elemento construtivo, como a utilização de materiais rígidos, como gesso ou plaquetas de vidro coladas ao suporte, que se rompem caso a fenda apresente oscilação na abertura, ou por meio da medição da variação de abertura com fissurómetro (Figura 17).

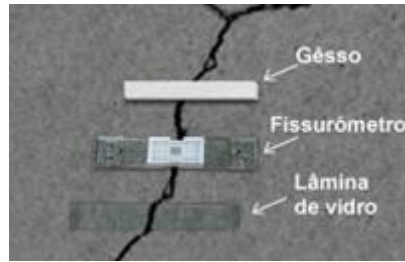


Figura 17 - Métodos expeditos de monitorização da actividade das fendas [19]

O **fissurómetro** (Figura 18) é constituído por duas partes, designadas por “A” e “B”, executadas em plástico flexível e transparente. A primeira, em forma de “T”, tem impressos dois traços de referência em esquadria. A segunda, de forma rectangular, tem impresso um reticulado graduado em 0,05 mm, e é dotada de duas ranhuras nas quais a parte “A” vem introduzida, por forma a que os traços de referência e o reticulado fiquem sobrepostos e centrados.

O equipamento é fixo ao elemento a monitorizar de modo a que as setas impressas nos extremos fiquem centradas com os traços e que o centro do reticulado coincida com a fenda. De seguida, posiciona-se o fissurómetro segundo a direcção mais próxima da normal à fenda. Após o completo endurecimento da cola de fixação, são retirados os dois autocolantes e o fissurómetro fica a medir os movimentos da fenda no ponto [18].

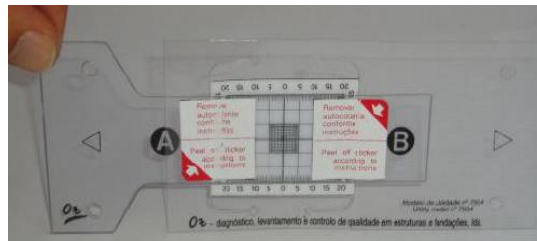


Figura 18 - Fissurómetro [18]

O ensaio de **ultra-sons** é também muitas vezes utilizado para o diagnóstico em elementos de betão, pois permite avaliar a homogeneidade dos elementos, isto é, se existem vazios ou outras discontinuidades no seu interior. Este ensaio consiste na medição do tempo de trânsito da vibração das ondas ultra-sónicas entre um emissor e um receptor. Sabendo a distância entre os transdutores, é possível calcular a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas através do betão, que é alterada se existirem discontinuidades, como as fendas.

De seguida, esquematizam-se as três formas de realização do ensaio de ultra-sons. Como mostra a Figura 19, quando é possível ter acesso a faces paralelas do elemento de betão, é usual e mais correcto optar pela transmissão directa (onda transmitida em linha recta). Opta-se pela transmissão semidirecta quando se pode aceder a faces perpendiculares do elemento, sendo a onda transmitida entre o emissor e o receptor diagonal. E recorre-se a transmissão indirecta ou superficial quando apenas é possível aceder a uma face do elemento e, desta forma, a onda transmitida percorre o interior do betão, do emissor para o receptor, fazendo um “caminho” em semicírculo. Este método pode ser utilizado para estimar a profundidade das fendas quando a inspecção visual não é conclusiva.



Figura 19 - Ensaio de ultra-sons - métodos de disposição dos transdutores (adaptado de [18])

Na Figura 20 apresenta-se um esquema que resume as técnicas de diagnóstico mais comuns para avaliação da fendilhação, bem como os parâmetros avaliados na sua aplicação.

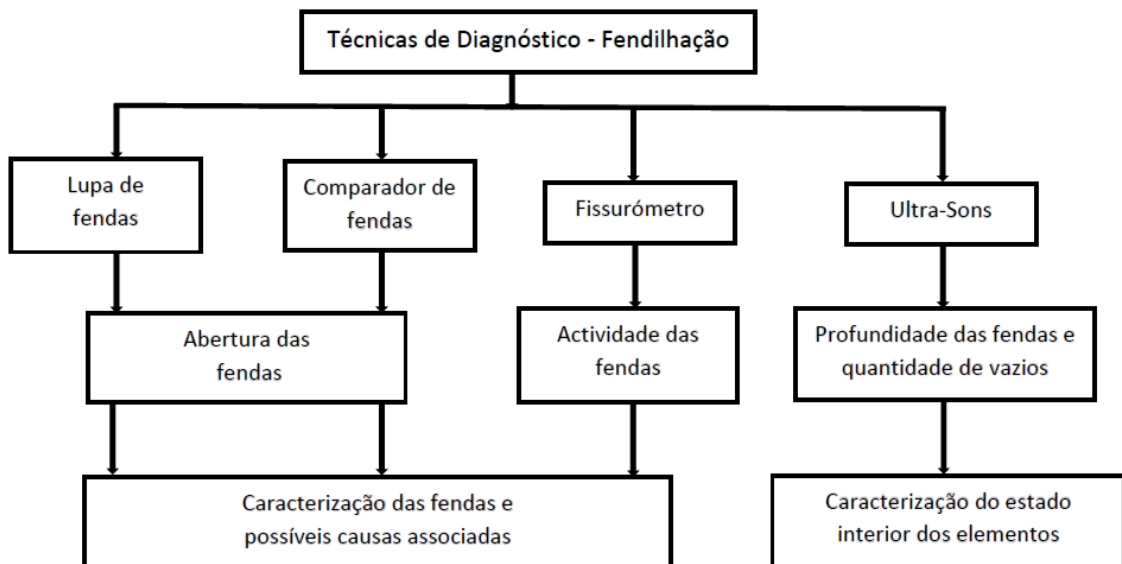


Figura 20 - Técnicas de diagnóstico para a avaliação da fendilhação - parâmetros avaliados (adaptado de [4])

2.4 Considerações finais

Neste capítulo referiram-se os principais aspectos relacionados com as anomalias susceptíveis de ocorrerem em estruturas e elementos de betão e descreveram-se as suas potenciais causas. Sendo a anomalia em foco para a presente dissertação a fendilhação, descreveram-se em maior detalhe as suas causas, bem como os principais aspectos que caracterizam as fendas.

Salienta-se o facto de as cargas de cálculo, em geral, provocarem a fendilhação do betão, mas tal não ser geralmente preocupante. No entanto, se as cargas forem excessivas, darão origem a níveis de fendilhação inaceitáveis. Um elevado estado de fendilhação poderá levar o dono de obra a uma tomada de decisão quanto à opção a tomar que, na maior parte dos casos, incide na reparação das fendas.

Quanto às técnicas de inspecção mais relevantes para esta anomalia, a inspecção visual é sem dúvida essencial para o diagnóstico, visto ser muito útil na escolha de outras técnicas a utilizar. As técnicas *in situ* permitem essencialmente obter resultados imediatos e de forma expedita, são de custo reduzido e não provocam danos significativos nos elementos. De uma maneira geral, o complemento entre a inspecção visual e a inspecção detalhada fornece resultados fiáveis se as técnicas forem aplicadas com rigor e se for elaborada uma análise correcta dos resultados obtidos. Salienta-se ainda o facto de ser imprescindível o diagnóstico na reabilitação, pois só conhecendo a causa ou causas da anomalia é que se pode intervir mais correcta e eficazmente na sua eliminação da mesma [20].

Concluiu-se, assim, que avaliar e conhecer bem as causas que deram origem à fendilhação é essencial para uma correcta intervenção e prevenção do aparecimento no futuro da mesma anomalia, sendo necessário não intervir apenas na anomalia, mas também nas suas causas. Deve também conhecer-se a evolução do estado de fendilhação do elemento ao longo do tempo, o que permite saber se houve estabilização ou não, pois tal é crucial para conhecer a segurança em serviço das estruturas e tomar a decisão mais acertada quanto à sua reparação. Este aspecto será abordado em detalhe no *Capítulo 4 – Tecnologias da Reparação de Fendas por Injecção*.

3 Enquadramento Normativo

3.1 Considerações iniciais

A norma Europeia **EN 1504 – Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão** abrange todos os aspectos relacionados com a reparação de betão e está dividida em dez partes que se enumeram em seguida:

EN 1504-1 [21]: Definições;

EN 1504-2 [22]: Sistemas de protecção superficial;

EN 1504-3 [10]: Reparação estrutural e não estrutural;

EN 1504-4 [23]: Ligação estrutural;

EN 1504-5 [13]: Injecções em betão;

EN 1504-6 [24]: Produtos para ancoragens;

EN 1504-7 [15]: Protecção de armaduras contra a corrosão;

EN 1504-8 [26]: Controlo de qualidade e critérios de conformidade;

EN 1504-9 [5]: Princípios gerais para a utilização de materiais e sistemas de reparação;

EN 1504-10 [27]: Aplicação de produtos e sistemas, e controlo de qualidade dos trabalhos.

A norma EN 1504 lida com todos os aspectos do processo de reparação e/ou protecção incluindo os seguintes [28]:

- Definições e princípios de reparação;
- Necessidade de diagnóstico preciso das causas da deterioração antes da especificação do método de reparação;
- Requisitos de desempenho dos produtos e métodos de ensaio;
- Controlo de produção na fábrica e avaliação da conformidade, incluindo a marcação CE;
- Métodos de aplicação e controlo da qualidade dos trabalhos.

Este capítulo incide nos requisitos de desempenho dos produtos utilizados na protecção e reparação de estruturas de betão, nos métodos de ensaio e na avaliação da conformidade dos produtos.

Em relação à fendilhação de elementos de betão, das dez partes da norma, apenas seis são relevantes, nomeadamente as partes 1, 3, 5, 8, 9 e 10.

Ainda assim, para o presente trabalho, não será dada particular atenção à parte 8 da EN 1504, já que esta foca no controlo de qualidade e conformidade dos produtos em fábrica. Neste capítulo será dada apenas uma noção genérica acerca do controlo de produção em fábrica (CPF), mas serão excluídos os processos de certificação, marcação ou rotulagem, visto que o trabalho focará nos requisitos de desempenho e avaliação de conformidade dos produtos, bem como no controlo de qualidade dos métodos de injeção em obra no *Capítulo 4 – Tecnologias da Reparação de Fendas por Injeção*.

Como foi discutido no capítulo anterior (*Capítulo 2 – Fendilhação em Elementos de Betão Armado*), uma reparação bem sucedida de uma estrutura de betão começa com a correcta determinação das condições da estrutura, a identificação das causas da deterioração e a definição dos objectivos de protecção e reparação. Todas as outras etapas no processo de reparação e protecção dependem dos seguintes pontos que a EN 1504 identifica [28]:

- Selecção do(s) princípio(s) de actuação apropriado(s);
- Selecção do(s) método(s) de protecção e reparação;
- Definição das propriedades dos produtos e sistemas;
- Especificação dos requisitos de manutenção posteriores à protecção e reparação.

É relevante referir ainda que a EN 1504 inclui referências de outras normas, que são citadas nos locais apropriados do texto e listadas em “Referências Normativas”. Ao longo deste capítulo, seguir-se-á o mesmo princípio, sendo listadas todas as normas relevantes no final, bem como a correspondência entre alguns documentos normativos Europeus e Nacionais (ver *Anexo C*).

3.2 Requisitos de desempenho

3.2.1 Metodologias, sistemas e produtos de reparação

A EN1504-9 enumera 37 métodos de reparação (ver *Anexo D*) relacionados com 11 princípios de actuação, enunciados na Tabela 1, baseados nas leis físicas e químicas que permitem a prevenção ou estabilização dos processos de deterioração físicos ou químicos do betão e a corrosão das armaduras. Pode ser necessário considerar a utilização de combinações de vários métodos para reparar as estruturas. Nestes casos, é necessário tomar precauções para que a combinação de diferentes métodos não introduza novos danos na estrutura.

Tabela 1 - Princípio de actuação para protecção e reparação das estruturas de betão (adaptado de [28])

Princípio	Definição	
Princípios relacionados com defeitos no betão		
P1	Protecção contra o ingresso	Redução ou prevenção da absorção de agentes agressivos (ex. água, outros líquidos, vapor, gases e agentes biológicos).
P2	Controlo de humidade	Ajuste e manutenção do teor de humidade no betão dentro da gama de valores especificada.
P3	Reparação de betão	Restituição do betão original de um elemento da estrutura à sua forma e função específicas originais ou substituição.
P4	Reforço estrutural	Aumento ou restituição da capacidade de carga de um elemento da estrutura de betão.
P5	Resistência física	Aumento da resistência a ataques físicos ou mecânicos.
P6	Resistência química	Aumento da resistência da superfície do betão à deterioração por ataque químico.
Princípios relacionados com a corrosão das armaduras		
P7	Preservação ou restauração da passividade	Criação de condições químicas nas quais a superfície da armadura mantém ou volta a adquirir a sua condição passiva.
P8	Aumento da resistividade	Aumento da resistividade eléctrica do betão.
P9	Controlo catódico	Criação de condições nas quais as áreas potencialmente catódicas da armadura são incapazes de produzir uma reacção anódica.
P10	Protecção catódica	Protecção do cátodo de uma célula eletroquímica ou eletrolítica.
P11	Controlo das áreas anódicas	Criação de condições para as áreas potencialmente anódicas da armadura não participarem numa reacção de corrosão.

Como apresentado na Tabela 1, algumas fendas no betão endurecido resultam da corrosão das armaduras. Estas não devem ser reparadas simplesmente por enchimentos ou selagem. Estes defeitos deverão ser reparados de acordo com os princípios 7 a 11 da EN 1504-9.

O tratamento de fendas dá resposta a dois princípios referidos na parte 9 da EN1504, enunciados em seguida:

- **Princípio 1 – Protecção contra o ingresso:** este princípio inclui medidas para reduzir a porosidade ou a permeabilidade da camada superficial do betão. Tal é obtido tratando a superfície do betão (isto é, utilizando um sistema de protecção superficial do betão) ou selando fendas (por exemplo, por injeção, segundo a EN 1504-5, ou por ligação superficial ou enchimento).
- **Princípio 4 – Reforço estrutural:** ao utilizar este princípio é essencial considerar todas as tensões associadas à estrutura original, bem como à sua reparação. Certos sistemas poderão impor tensões adicionais na estrutura reparada, de que resultam alterações no comportamento estrutural da estrutura original. Como a injeção de fendas não reforça uma estrutura (não altera o comportamento original da estrutura, apenas recompõe o seu monolitismo), poderá ser utilizada para reparar um elemento à sua condição inicial.

Na Tabela 2, são listados os dois princípios enunciados e apresentam-se ainda os respectivos métodos de reparação adequados.

Tabela 2 - Princípios e métodos de reparação associados ao tratamento de fendas (adaptado de [5])

Princípio	Definição	Método	Descrição
P1	Protecção contra o ingresso	M1.4	Preenchimento de fendas
P4	Reforço estrutural	M4.5	Injecção de fendas e vazios
		M4.6	Enchimento de fendas e vazios

De acordo com a EN 1504, os sistemas e produtos de reparação devem satisfazer requisitos definidos a três níveis:

- O fabricante deve indicar um certo número de **características e propriedades dos materiais** através de valores característicos ou valores certificados;
- É necessário que essas características e propriedades satisfaçam os **requisitos mínimos da norma**;
- É necessário que certas propriedades e características dos materiais de reparação satisfaçam os **critérios de conformidade** com as tolerâncias definidas para o controlo de recepção (controlo de identificação dos produtos).

Considera-se importante referir que, de acordo com a EN1504, as fendas que são formados por corrosão das armaduras não devem ser reparadas por meio de técnicas de injeção, a menos que a curto prazo (um a dois anos) a solução seja aceitável e que tais fendas sejam melhor colmatadas por técnicas mais tradicionais de reparação de betão, em combinação com medidas de controlo de corrosão adequadas [17].

3.2.2 Características de desempenho dos produtos de injecção

A EN1504-5 define, no seu ponto 3, termos relacionados com os produtos e sistemas para reparação, para utilização na manutenção e protecção, reabilitação e reforço de estruturas de betão, relevantes para o presente trabalho.

Os produtos de injeção são classificados em três categorias, **F**, **D** e **S**:

- **Produtos de injeção para enchimento transmissor de forças das fissuras, vazios e interstícios no betão (F)** – produtos capazes de se colarem à superfície do betão e transmitirem forças através deles;
- **Produtos de injeção para enchimento dúctil das fissuras, vazios e interstícios no betão (D)** – produtos flexíveis capazes de suportar movimentos ulteriores.
- **Produtos de injeção para enchimento expansivo das fissuras, vazios e interstícios no betão (S)** – produtos capazes de, após a reacção, expandir repetidamente por absorção de água, pelo facto de as moléculas de água se ligarem às moléculas dos produtos de injeção.

A parte 5 da norma distingue ainda produtos de injeção quanto ao tipo químico e principais constituintes, complementando as definições presentes na EN1504-1 (ver *Anexo A*), em duas categorias, **P** e **H**:

- **Produtos de injeção formulados com ligantes poliméricos reactivos (P)** – produtos cujo endurecimento resulta da polimerização dum ligante polimérico reactivo. A parte reactiva do ligante polimérico envolvida no endurecimento é o grupo funcional;
- **Produtos de injeção formulados com ligantes hidráulicos (H)** – produtos cujo endurecimento resulta da reacção de hidratação de um ligante hidráulico.

A norma especifica ainda características de desempenho e segurança dos produtos de injeção utilizados na reparação e protecção do betão, assegurando os seguintes aspectos:

- O enchimento, apto a transmitir forças, de fissuras, vazios e interstício no betão (categoria **F**);
- O enchimento dúctil de fissuras, vazios e interstícios no betão (categoria **D**);
- O enchimento expansivo de fissuras, vazios e interstícios (categoria **S**).

A **injectabilidade** é outro conceito presente na norma que é muito importante na definição dos produtos de injeção. A injectabilidade do produto de injeção é definida pela aptidão do produto para penetrar numa fissura, e é dada pela mínima largura de fissura na qual o produto é injectável. A injectabilidade é declarada pelo produtor e verificada por um dos ensaios de injectabilidade.

Para cada um dos tipos de enchimento de fendas referidos, nas Tabelas 3, 4 e 5, listam-se as características de desempenho dos produtos de injeção que são requeridos para “todas as utilizações previstas” e para “certas utilizações previstas”, de acordo com os princípios e métodos definidos na EN1504-9, e resumidos na Tabela 1.

As características primárias de desempenho dos produtos são classificados como [28]:

- **Características de base** – dizem respeito à aderência, retração, compatibilidade com o aço e com o betão, temperatura de transição vítrea, estanqueidade à água, que são indispensáveis para as utilizações previstas;
- **Características de trabalhabilidade** – dizem respeito às condições de trabalho em que o produto pode ser aplicado (como a largura ou o estado de humidade da fissura), sendo estas características declaradas pelo produtor e posteriormente submetidas a ensaio;
- **Características de reactividade** – dizem respeito ao tempo de trabalhabilidade e desenvolvimento da resistência do produto;
- **Características de durabilidade** – dizem respeito ao comportamento a longo prazo do produto endurecido sob influência climática.

Podem ser consideradas outras características para certas utilizações dos produtos, tais como a teor de cloretos, o comportamento à corrosão e a estanqueidade para aplicações de impermeabilização [17].

As características são descritas em tabelas na norma [13], onde é feita ainda referência a um método de ensaio previsto para cada uma das características. Estes ensaios serão realizados pelos fabricantes de materiais e os resultados citados nas fichas técnicas e folhas de dados dos produtos (bem como na marcação CE, se for caso disso) para mostrar a conformidade com a EN1504. Assim, a gama de materiais de injeção em conformidade com a norma e com marcação CE será limitada aos que cumprem todos os requisitos, o que restringe a escolha, mas garante a melhor qualidade dos produtos [17]. Todas as características de desempenho dos produtos de injeção utilizados segundo o Princípio 1 e Método 1.4 são listadas nas Tabelas 3, 4 e 5. As características de desempenho dos produtos de injeção utilizados segundo o Princípio 4 e os Métodos 4.5 e 4.6 são listados apenas na Tabela 3.

Tabela 3 - Produtos de injeção para enchimento transmissor de forças das fissuras (F) (adaptado de [13])

Características de desempenho - M1.4, M4.5 e M4.6	Aplicações
Características de base	
Aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção (H, P)	●
Aderência pelo ensaio de corte por compressão (H, P)	○
Retracção volumétrica (P)	●
Exsudação (H)	●
Variação volumétrica (H)	●
Temperatura de transição vítrea (P)	○
Teor de iões cloreto (H)	○
Características de trabalhabilidade	
Injectabilidade em meio seco > Aberturas da fissura de 0.1, 0.2 ou 0.3 mm - determinação da injectabilidade e resistência à tracção por compressão > Abertura da fissura de 0.5 ou 0.8 mm ou quando a EN1771 não é aplicável - aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção (H, P)	●
Injectabilidade em meio não seco > Aberturas da fissura de 0.1, 0.2 ou 0.3 mm - determinação da injectabilidade e resistência à tracção por compressão > Abertura da fissura de 0.5 ou 0.8 mm ou quando a EN1771 não é aplicável - aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção (H, P)	●
Viscosidade (P)	●
Tempo de escoamento (H)	●
Características de reactividade	
Tempo de trabalhabilidade (H, P)	●
Desenvolvimento da resistência à tracção para polímeros (P)	●
Tempo de presa (H)	●
Durabilidade	
Aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção após ciclos térmicos e de secagem-molhagem (H, P)	●
Desenvolvimento da resistência à tracção para polímeros (P)	●
Legenda: (H) produto de injeção formulado com ligante hidráulico (P) produto de injeção formulado com ligante polimérico reactivo	
● para todas as aplicações previstas ○ para certas aplicações previstas	

Tabela 4 - Produtos de injeção para enchimento dúctil das fissuras (D) (adaptado de [13])

Características de desempenho - M1.4	Aplicações
Características de base	
Aderência e capacidade de alongação dos produtos de injeção dúctil	●
Estanqueidade à água	○
Temperatura de transição vítrea	○
Características de trabalhabilidade	
Injectabilidade em meio seco > Aberturas da fissura de 0.1, 0.2 ou 0.3 mm - determinação da injectabilidade > Abertura da fissura de 0.5 ou 0.8 mm ou quando a EN1771 não é aplicável - injeção entre lajes de betão	●
Injectabilidade em meio não seco > Aberturas da fissura de 0.1, 0.2 ou 0.3 mm - determinação da injectabilidade > Abertura da fissura de 0.5 ou 0.8 mm ou quando a EN1771 não é aplicável - injeção entre lajes de betão	●
Viscosidade	●
Razão e evolução da expansão	○
Características de reactividade	
Tempo de trabalhabilidade	●
Durabilidade	
Compatibilidade com o betão	●
Legenda: ● para todas as aplicações previstas ○ para certas aplicações previstas	

Tabela 5 - Produtos de injeção para enchimento expansivo das fissuras (S) (adaptado de [13])

Características de desempenho - M1.4	Aplicações
Características de base	
Estanqueidade à água	●
Comportamento à corrosão	○
Características de trabalhabilidade	
Viscosidade	●
Razão e evolução da expansão	●
Características de reactividade	
Tempo de trabalhabilidade	●
Durabilidade	
Sensibilidade à água: razão de expansão por imersão em água	●
Sensibilidade a ciclos de molhagem-secagem	●
Compatibilidade com o betão	●
Legenda: ● para todas as aplicações previstas ○ para certas aplicações previstas	

3.2.3 Classificação dos produtos de injeção

O produtor deve realizar ensaios de desempenho iniciais sobre o produto de acordo com os métodos indicados nas Tabelas 6, 7 e 8. Também a classificação dos produtos de injeção é baseada no desempenho dos produtos nos ensaios especificados nas mesmas tabelas.

Segundo a EN1504-5, os produtos de injeção são classificados de acordo com os requisitos de desempenho usando o sistema de **classificação UW** (U – Utilização prevista; W – Trabalhabilidade).

A letra **U**, relativa à utilização prevista, é atribuída em primeiro lugar, seguida de uma letra e de um algarismo entre parêntesis que indica a utilização prevista:

- Produto de injeção para enchimento transmissor de esforços das fissuras (F):
 - F1 - Aderência com resistência à tracção > 2 N/mm² (para injeção de fissuras, vazios e interstícios);
 - F2 - Aderência com resistência à tracção > 0,6 N/mm² (restringida ao enchimento de vazios e interstícios);
- D: Produto de injeção para enchimento dúctil das fissuras:
 - D1: estanque à água a 2 x 10⁵ Pa;
 - D2: estanque à água a 7 x 10⁵ Pa (para aplicações especiais);
- S: Produto de injeção para enchimento expansivo das fissuras:
 - S1: estanque à água a 2 x 10⁵ Pa;
 - S2: estanque à água a 7 x 10⁵ Pa (para aplicações especiais);

A letra **W**, relativa à trabalhabilidade, é seguida por 3 ou 4 grupos de números entre parêntesis:

- Primeiro grupo (um algarismo: 1, 2, 3, 5 ou 8) – resultado do ensaio de injectabilidade que define a mínima largura de fissura permitida, em décimas de milímetro;
- Segundo grupo (um ou mais números) – resultado do ensaio de injectabilidade e dos ensaios relevantes relacionados com o desempenho (ensaios de aderência para F, capacidade de alongação e estanqueidade à água para D, estanqueidade à água para S), que definem o estado de humidade da fissura (1 - seco; 2 - húmido; 3 - molhado; 4 - cheio de água);
- Terceiro grupo (dois números – valores da temperatura de utilização máxima e mínima;
- Quarto grupo (um número) – aplicável só a F:
 - Utilizável para fissuras com movimentos diários (1) > 10% ou 0.03 mm, ou (2) < 10% ou 0.03 mm, durante o endurecimento.

Por exemplo, a classificação **U(F1) W(1) (1/2) (5/30) (1)** identifica um produto com as seguintes características: transmissor de forças das fissuras; injectável em fissura de 0.1 mm, seca ou húmida; utilizável de 5°C a 30°C; utilizável para fissuras sujeitas a movimentos diários > 10% ou 0.03 mm durante o endurecimento [13].

Tabela 6 - Requisitos de desempenho para produtos de injeção para enchimento transmissores de forças das fissuras (F) (adaptado de [13])

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisitos
Características de base		
Aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção (H, P)	EN 12618-2	→ > 2 N/mm ² (H) → > 0,6 N/mm para produtos de injeção só para enchimento de vazios e interstícios → Rotura coesiva pelo substracto
Aderência pelo ensaio de corte por compressão (H, P)	EN 12618-3	→ Rotura monolítica (modo e fendilhação semelhante ao dos prismas de controlo)
Retracção volumétrica (P)	EN 12617-2	→ < 3%
Exsudação (H)	EN 445#, secção 3.3	→ Exsudação < 1% do volume inicial após 3h
Variação volumétrica (H)	EN 445#, secção 3.4	→ -1% < variação volumétrica < +5% do Vi
Temperatura de transição vítrea (P)	EN 12614	→ > 40°C
Teor de iões cloreto (H)	EN 196-2	→ < 0,2%
Características de trabalhabilidade		
Injectabilidade em meio seco ou não seco > Aberturas da fissura de 0.1, 0.2 ou 0.3 mm - determinação da injectabilidade e resistência à tracção por compressão > Abertura da fissura de 0.5 ou 0.8 mm ou quando a EN1771 não é aplicável - aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção (H, P)	EN 1771 EN 12618-2 (para larguras de fissuras de 0.3, 0.5 e 0.8 mm, devem usar-se espaçadores de plástico flexíveis com as mesmas dimensões da largura).	Classes de Injectabilidade: → < 4 min (injectabilidade elevada) para largura de fissuras de 0.1 mm → < 8 min (pelo menos exequível) para largura de fissuras de 0.2 mm e 0.3 mm Ensaio de tracção por compressão: → > 7 N/mm ² (P) → > 3 N/mm ² (H) Percentagem de enchimento da fissura: → > 90% Requisitos de "aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção" acima satisfeitos
Viscosidade (P)	EN ISO 3219	Valor declarado
Tempo de escoamento (H)	EN 14117	Valor declarado
Características de reactividade		
Tempo de trabalhabilidade (H, P)	EN ISO 9514# (aplicam-se as definições 3.4 e 3.5 do Anexo B)	Valor declarado
Desenvolvimento da resistência à tracção para polímeros (P)	EN 1543#	→ Resistência à tracção > 3 N/mm ² dentro de 72 horas à mínima temperatura de utilização ou dentro de 10 horas a esta temperatura no caso de movimento diário de fissuras superior a 10% ou a 0.03 mm (toma-se o valor mais baixo)
Tempo de presa (H)	EN 196-3#	Valor declarado
Durabilidade		
Aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção após ciclos térmicos e de secagem-molhagem (H, P)	EN 12618-2	→ Redução da resistência à tracção < 30% dos valores iniciais (H)
Desenvolvimento da resistência à tracção para polímeros (P)	EN 12618-2	→ Rotura coesiva pelo suporte
Legenda: (H) produto de injeção formulado com ligante hidráulico (P) produto de injeção formulado com ligante polimérico reactivo		

#Ver Anexo C

Tabela 7 - Requisitos de desempenho para produtos de injeção para enchimento dúctil das fissuras (D) (adaptado de [13])

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisitos
Características de base		
Aderência e capacidade de alongação dos produtos de injeção dúctil	EN 12618-1	→ Aderência: Valor declarado → Alongamento > 10%
Estanqueidade à água	EN 14068	→ Estanque à água a 2×10^5 Pa → Aplicações particulares: estanque a 7×10^5 Pa
Temperatura de transição vítrea	EN 12614	Apenas para informação
Características de trabalhabilidade		
Injectabilidade em meio seco ou não seco > Aberturas da fissura de 0.1, 0.2 ou 0.3 mm - determinação da injectabilidade e resistência à tracção por compressão > Abertura da fissura de 0.5 ou 0.8 mm ou quando a EN1771 não é aplicável - aderência pelo ensaio da resistência da colagem à tracção (H, P)	EN 1771 Coberto pela EN 12618-2 secções 4.3 a 4.6 (para larguras de fissuras de 0.3, 0.5 e 0.8 mm, devem usar-se espaçadores de plástico flexíveis com as mesmas dimensões da largura)	Classes de injectabilidade: → < 4 min (injectabilidade elevada) para largura de fissuras de 0.1 mm → < 8 min (pelo menos exequível) para largura de fissuras de 0.2 mm e 0.3 mm Porcentagem de enchimento da fissura: → > 90%
Viscosidade (P)	EN ISO 3219	Valor declarado
Razão e evolução da expansão	EN 14117	Valor declarado
Características de reactividade		
Tempo de trabalhabilidade (H, P)	EN ISO 9514 (aplicam-se as definições 3.4 e 3.5 do Anexo B)	Valor declarado
Durabilidade		
Compatibilidade com o betão	EN 12618-2	→ Nenhuma rotura no ensaio de compressão → Perda de trabalho de deformação <20%

Tabela 8 - Requisitos de desempenho para produtos de injeção para enchimento expansivo das fissuras (S)
(adaptado de [13])

Características de desempenho	Método de ensaio	Requisitos
Características de base		
Estanqueidade à água	EN 14068	→ Estanque à água a 2×10^5 Pa → Aplicações particulares: estanque a 7×10^5 Pa
Comportamento à corrosão	Aplicam-se as regulamentações Nacionais até haver Norma Europeia	→ Não deve conter quaisquer substâncias em quantidades que possam causar corrosão das armaduras
Características de trabalhabilidade		
Trabalhabilidade/viscosidade	EN ISO 3219 A EN 1618-2 deve aplicar-se quando não se aplica a EN ISO 3219. Devem usar-se espaçadores de plástico flexíveis com as mesmas dimensões da largura	→ ≤ 60 mPa.s → % da fissura cheia > 95
Expansão e razão de expansão por imersão em água: Mudanças de volume e de peso por secagem ao ar e conservação em água	EN 14498	Valor declarado
Características de reactividade		
Tempo de trabalhabilidade	EN ISO 9514# (aplicam-se as definições 3.4 e 3.5 do Anexo B)	Valor declarado
Durabilidade		
Sensibilidade à água: Mudanças de volume e de peso por secagem ao ar e conservação em água	EN 14498 (regime de conservação A)	→ A razão de expansão deve atingir um nível constante durante a imersão em água
Sensibilidade aos ciclos de molhagem-secagem: Mudanças de volume e de peso por secagem ao ar e conservação em água	EN 14498 (regime de conservação B)	→ Nenhuma alteração da razão de expansão após imersão em água e após os ciclos de secagem-molhagem
Compatibilidade com o betão	Ensaio sobre provetes segundo a EN 12637-1 (6.2 e 7.3.1) Amostra: 6 provetes com 15 mm de espessura cada Conservação: 3 provetes em água e 3 numa solução de KOH a 1M.	→ As resistências são medidas aplicando uma carga de compressão à velocidade de 100 mm/min com um punção de 20 mm de \varnothing munido de uma cabeça cónica (ângulo de 60°) – Regista-se a curva carga-deformação → As resistências em relação aos provetes conservados em água não devem variar mais de 20%

Os **requisitos de desempenho** definem então os valores mínimos quantitativos que um produto deve cumprir quando testado sob os métodos e condições dos ensaios padrão [28].

Considera-se importante referir ainda que a norma deixa bem claro que os produtos de injeção endurecidos não devem libertar substâncias perigosas para a saúde e o ambiente.

Ver Anexo C

3.3 Avaliação de conformidade

3.3.1 Requisitos de identificação

A norma EN 1504-5 define que os ensaios de identificação devem ser realizados para mostrar a conformidade do produto com a norma. O produtor deve proceder a ensaios de identificação iniciais seleccionados e representativos do produto ou sistema, como se especifica nas Tabelas 9 e 10, respectivamente para produtos de injeção formulados com ligante hidráulico (H) e ligante polimérico reactivo (P). Estes ensaios podem e devem ser utilizados para confirmar a composição do produto em qualquer altura, pelo que o produtor deve guardar os registos relativos aos ensaios. As tolerâncias aceitáveis são dadas também nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Requisitos de identificação para produtos de injeção formulados com ligante hidráulico (H) (adaptado de [13])

Propriedade	Método de ensaio	Requisitos (desvio em % em relação ao valor declarado pelo produtor)
Componentes individuais		
Granulometria por difracção laser	ISO 13320-1	Confirmado por comparação
Mistura fresca		
Tempo de escoamento (cone de Marsh)	EN 14117 A viscosidade deve ser medida 5 min após ter sido completada a mistura dos componentes.	± 20
Tempo de presa	EN 196-3 [#]	± 20
Tempo de vida útil	EN ISO 9514 [#] O ensaio deve ser realizados em três temperaturas de condicionamento: 21°C e temperaturas máximas e mínimas recomendadas pelo produtor, com tolerância de ± 2°C. Amostra de ensaio: 1000 ml, em vez de 300 ml. NOTA: aplica-se a definição 3.4 do Anexo B	± 20
Estabilidade de filtração	EN 14497	≤ valor fornecido (μ)
Identificação sobre a mistura endurecida		
Resistência à compressão e massa volúmica	EN 12190	± 15

[#] Ver Anexo C

Tabela 10 - Requisitos de identificação para produtos de injeção formulados com ligante polimérico reactivo (P) (adaptado de [13])

Propriedade	Método de ensaio	Requisitos (desvio em % em relação ao valor declarado pelo produtor)
Componentes individuais		
→ Relacionados com o grupo funcional: Equivalente de epóxido Índice de amina Índice de hidroxilo Teor de isocianato Outro grupo funcional	EN 1877-1 EN 1877-2 EN 1240 EN 1242 De acordo com o grupo	- ± 5 ± 6 ± 10 ± 10
Massa volúmica	EN ISO 2811 (Partes 1 e 2)	± 3
Análise por infravermelhos	EN 1767	As posições relativas das bandas de absorção principais devem corresponder às do espectro de referência
Mistura fresca		
Viscosidade	EN ISO 3219 A viscosidade deve ser medida 5 min após ter sido completada a mistura dos componentes. A temperatura dos componentes individuais antes da mistura deve ser mantida constante (21 ± 2)°C. A temperatura da mistura fresca deve ser medida e registada antes da medição da viscosidade. Para produtos que endurecem em menos de 5 min, a viscosidade deve ser medida nos componentes não misturados.	± 20
Tempo de vida útil	EN ISO 9514 [#] O ensaio deve ser realizados em três temperaturas de condicionamento: 21°C e temperaturas máximas e mínimas recomendadas pelo produtor, com tolerância de ± 2°C. NOTA: aplica-se a definição 3.4 do <i>Anexo B</i>	± 20
Determinação da matéria volátil e não volátil	EN ISO 3251	± 5
Identificação sobre a mistura endurecida		
Resistência à tracção, alongamento e módulo de elasticidade (F; D)	EN ISO 527-1 e EN ISO 527-2 O ensaio deve ser realizado após 7 dias de condicionamento em condições normais para os produtos de injeção formulados com ligantes poliméricos reactivos, vertidos num substrato não aderente até uma espessura de 3 mm.	± 20
Propriedades de resistência (S)	Aplica-se uma carga de compressão com velocidade de 100 mm/min ao provete obtido a partir do ensaio de tempo de vida útil, com um punção de Ø 20 mm com cabeça cónica (ângulo 60°); regista-se a curva carga/deformação. O ensaio é realizado após 24h de condicionamento sob condições normais.	± 20

[#] Ver Anexo C

3.3.2 Controlo da produção em fábrica

Apesar de não constituir o foco principal desta dissertação, considera-se importante referir os requisitos e recomendações referentes ao controlo da produção em fábrica para avaliação da conformidade dos produtos ou sistemas.

Resumidamente, o produtor deve operar um sistema de controlo da produção em fábrica (CPF) que assegure que a produção continua a satisfazer os requisitos de identificação e de desempenho referidos anteriormente.

Para o desenvolvimento do CPF, o produtor pode seleccionar os ensaios representativos de identificação ou de desempenho apresentados nas tabelas anteriores. Também podem ser seleccionados outros métodos de ensaio, que devem ser correlacionáveis com os métodos iniciais de identificação ou de desempenho, de forma a assegurar a conformidade do produto com a norma. Tais correlações devem estar claramente documentadas no sistema do CPF [13].

3.4 Considerações finais

No presente capítulo apresentou-se uma descrição sucinta da norma EN 1504. Foram focadas as partes mais relevantes da norma quanto à reparação de fendas e concluiu-se que a norma é bastante clara quanto à temática em estudo.

Actualmente, com a EN 1504, na área da reparação do betão, todas as questões relacionadas com a reparação e protecção de betão são abrangidas por uma norma única [28]. O desempenho dos diferentes produtos disponíveis comercialmente pode ser comparado, pois a norma especifica não só os requisitos mínimos de desempenho, como também normaliza os métodos de ensaio. Em muitas situações, é essencial que os produtos tenham sido testados para a correcta utilização pretendida e que os critérios mínimos de desempenho tenham sido cumpridos ou mesmo excedidos.

O desenvolvimento teórico da reabilitação em betão tem, com a EN 1504, uma correspondência efectiva no campo prático, que veio normalizar as acções de intervenção e proporcionar um modelo melhorado para a execução de reparações de qualidade e eficazes nas estruturas de betão [28].

As várias partes da norma reforçam a ideia de que um projecto de reabilitação em betão, sobretudo com novos materiais, deve obedecer a etapas especificadas neste complexo mas bastante específico documento, de modo a assegurar a qualidade dos trabalhos de reparação e protecção das estruturas de betão, o que resultará no aumento da satisfação dos utilizadores.

De uma maneira geral, neste capítulo, mostrou-se que a conformidade de um produto ou sistema com os requisitos da norma EN 1504 e os valores declarados deve ser verificada através de ensaios de desempenho e ensaios de identificação, bem como através do controlo de produção em fábrica.

4 Tecnologia da Reparação de Fendas por Injecção

4.1 Considerações iniciais

O tratamento de fendas no betão visa restabelecer as características de monolitismo, repor as características de impermeabilidade e estanqueidade (selar a estrutura à entrada de água e agentes agressivos) ou apenas melhorar o seu aspecto estético, aumentando assim os seus padrões de funcionalidade e durabilidade [15].

Neste capítulo apresentam-se as tecnologias (materiais, equipamentos e métodos) para a correcta e eficaz reparação de fendas por injecção em elementos de betão armado.

No que diz respeito ao tratamento de fendas e respectivos objectivos da reparação das mesmas, os sistemas de injecção com resinas são as soluções mais comuns e mais eficazes para a reposição da estanqueidade, a reconstituição do monolitismo e capacidade resistente das estruturas de betão, pelo que será a tecnologia de reparação de fendas mais em foco ao longo do capítulo.

Os sistemas de injecção não só preenchem fendas, vedando flexivelmente e impermeabilizando as estruturas de betão, como também podem recompor a integridade estrutural e a capacidade de carga das estruturas.

Na Figura 21 sintetizam-se as principais razões que levam à reparação de fendas em estruturas de betão armado.




	Durabilidade da construção Reparação da fissura impede o ingresso de substâncias que possam prejudicar o betão.
	Estanqueidade da estrutura Reparação da fissura de forma a recuperar a estanqueidade da estrutura.
	Resistência da estrutura Injecções de forma a garantir a integridade estrutural.

Figura 21 - Principais razões para a reparação de fendas
(adaptado de [15])

4.2 Técnicas de reparação

Existem três abordagens possíveis para a reparação de fendas no betão:

- Revestimento superficial;
- Selagem;
- Injecção.

As duas primeiras abordagens, revestimento superficial e selagem, destinam-se ao tratamento de fendas superficialmente, enquanto a injecção se destina reparação de fendas em profundidade, como se descreverá em seguida. Ainda assim, aquando da injecção de fendas com determinado tipo de materiais e equipamentos, é necessário executar a selagem das mesmas (técnicas e procedimentos que serão abordados ao longo do presente capítulo).

4.2.1 Injecção

O método mais eficaz para a reparação de fendas em estruturas de betão armado é a injecção de produtos de baixa viscosidade, visto ser um processo rápido, expedito e relativamente económico. A injecção é ainda a técnica que garante o melhor enchimento dos espaços vazios formados entre os bordos de uma fenda e a perfeita ligação entre os mesmos, repondo o monolitismo das estruturas e transmitindo forças através da reparação. Deste modo, a tecnologia de reparação de fendas em betão por injecção será o foco das próximas secções.

Tal como foi descrito no *Capítulo 2 – Fendilhação em Elementos de Betão Armado*, a EN1504 define cinco classes de abertura de fendas em função da injectabilidade: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 e 0.8 mm [13], mas ainda assim não existe regra para a abertura mínima de fissura para injecção. Apesar de ser possível injectar fendas com aberturas a partir dos 0.05/0.1 mm (teoricamente), normalmente a injecção é usada no tratamento da fendilhação do betão quando existem fendas com aberturas superiores ou iguais a 0.4 mm, pois na prática fendas de abertura na ordem dos 0.1 ou 0.2 mm são recorrentes em estruturas de betão e não têm expressão suficiente que justifique o recurso a injecção; nesses casos seria necessária uma pressão bastante elevada, que faria com que se corresse o risco de o betão na envolvente da fenda ser danificado e se criassem tensões que poderiam abrir fendas de maiores dimensões.

4.2.2 Selagem

A selagem é utilizada para vedar os bordos de fendas activas, utilizando um material que seja necessariamente aderente, resistente mecânica e quimicamente e seja suficientemente flexível para se adaptar à deformação da fenda. Sendo uma reparação que não preenche a fenda na sua total profundidade, não é uma reparação estrutural, pois não garante o monolitismo da estrutura. Ainda assim, pode ser utilizada a selagem com materiais rígidos em combinação com injecção de produtos rígidos para conferir rigidez às estruturas.

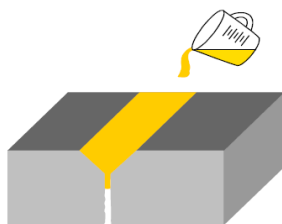


Figura 22 - Selagem de fenda (adaptado de [15])

A selagem da fenda pode definir-se então como um enchimento aplicado sem pressão à superfície da fenda, após a sua preparação com entalhes em “V” previamente executados com recurso a martelo pneumático, disco de coroas diamantadas ou escopro para alargamento da abertura superficial em todo o comprimento da fenda [29], como ilustra a Figura 22, de modo a estancar a fenda superficialmente.

4.2.3 Revestimento superficial

Tal como o nome sugere e a Figura 23 ilustra, o revestimento superficial consiste apenas na colmatação da fenda à superfície, sem tratamento prévio (apenas limpeza do suporte). Para colmatar fendas de dimensão reduzida, recorre-se normalmente ao revestimento superficial que garante o bom aspecto estético, sendo que não é usado quando se pretende reparar fendas para reparação estrutural ou impermeabilização das estruturas.

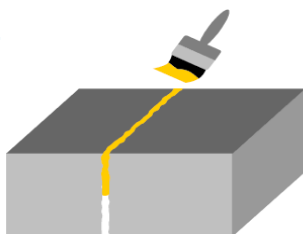


Figura 23 - Revestimento superficial de fenda (adaptado de [15])

4.3 Sistemas de injeção

Os sistemas de injeção podem ser distinguidos em (i) sistemas rígidos ou (ii) sistemas flexíveis consoante o tipo de reparação. Estes sistemas apresentam características distintas e podem ser utilizados consoante as manifestações patológicas das estruturas [30], as condições das fendas em termos de abertura, actividade e presença de água, tal como referido anteriormente, e ainda o carácter estrutural ou não da reparação.

4.3.1 Sistemas rígidos

A reparação com sistemas rígidos é a solução mais correcta quando a origem da fenda é estrutural e/ou os movimentos da fenda são nulos (fendas passivas). Nestes casos a opção deve incidir em materiais que depois de endurecidos possam transferir os esforços solicitantes da estrutura, restaurando as suas condições iniciais.

No que diz respeito à reparação de elementos de betão para recomposição estrutural, o tratamento estrutural visa recompor as condições iniciais e de monolitismo da estrutura [30]. Para que a estrutura volte a ser monolítica, é necessário injectar as fendas com materiais rígidos e com elevada resistência mecânica que garantam excelente aderência ao betão. Esses materiais sendo rígidos, não podem ser aplicados em fendas com movimento. Assim sendo, as resinas epoxídicas e os produtos cimentícios (*grouts*) para injeção constituem os denominados sistemas rígidos comuns, sendo as soluções mais correctas para os tipos de reparações referidas.

4.3.2 Sistemas flexíveis

Em caso de necessidade de tratamento fendas com movimento, com ou sem presença de água, os sistemas flexíveis à base de poliuretano são a solução mais comum [30], sendo utilizados também produtos de resina acrílica altamente flexíveis para situações em que há necessidade de injeção em grandes áreas, devido à sua viscosidade ser extremamente reduzida.

Na reparação de fendas para garantia de estanqueidade das estruturas, a solução de reparação visa o impedimento de entrada de água (ou outros agentes agressivos) nas estruturas através das zonas fendilhadas. Os sistemas de reparação mais utilizados nestes casos são à base de poliuretano hidroactivado [30] formando uma barreira flexível em pouco tempo devido ao rápido tempo de reacção, mesmo na presença de água. Não sendo uma solução tão comum existem também sistemas flexíveis à base de produtos de gel acrílico de muito rápida reacção.

É importante notar que todos os materiais flexíveis possuem uma expansão limitada, sendo que a fenda deve ser injectada na sua máxima largura de forma a limitar a expansão do material [30].

Todos os produtos de reparação referidos e suas propriedades mais relevantes como soluções de reparação para injeção de fendas serão caracterizados e descritos em seguida na secção *4.4 Caracterização geral dos materiais para produtos de injeção*.

4.4 Caracterização geral dos materiais para produtos de injeção

Para garantir a eficácia e a durabilidade das reparações realizadas com sistemas de injeção, a correcta combinação entre material a injectar, equipamento de injeção e método de aplicação é essencial, sendo estes os principais factores de sucesso da injeção [31].

A selecção do material adequado à injeção requer a escolha dos produtos certos para atender aos requisitos definidos no projecto de reparação, sendo por isso o primeiro factor-chave para o sucesso da reparação de fendas [31].

Em geral, os principais requisitos para os materiais de preenchimento das fendas são os seguintes: boa aderência ao betão, viscosidade, flexibilidade e resistências mecânicas adequadas ao tipo de reparação, capacidade de deformação após endurecimento, boa trabalhabilidade dentro dos limites exigidos, retração volumétrica controlada e estabilidade química da mistura dos componentes que compõem o produto de injeção [32].

Os requisitos para os materiais a utilizar em cada caso serão baseados, como foi discutido anteriormente, no *Capítulo 2 – Fendilhação em Elementos de Betão Armado*, nas características das fendas, que irão influenciar a escolha dos materiais mais adequados a injectar, principalmente em função da sua abertura, da sua actividade (movimentos) e da presença de água.

A **abertura da fenda** é uma característica elementar para a escolha do material a injectar. Em geral, as fendas de menor espessura requerem um material de injeção com menor viscosidade (mais próxima da água) para que possam penetrar no vazio mais facilmente com menor pressão de injeção. Tal é conveniente pois uma baixa pressão e velocidade de injeção garantem um mais efectivo e eficaz preenchimento dos vazios, não causando tensões elevadas no interior da estrutura. Por outro lado, materiais de injeção com maior viscosidade podem ser utilizados em fendas mais largas, sendo mais fácil garantir o seu total preenchimento.

A **actividade das fendas** influencia também em muito a escolha da melhor opção quanto ao produto a injectar. No caso de fendas passivas (ou com amplitude de movimentos sem expressão significativa) de pequenas dimensões, a melhor opção é a injeção de resina epoxídica rígida para movimentos nulos ou praticamente nulos. Se as fendas apresentarem maior abertura, podem utilizar-se *grouts* cimentícios. Em fendas activas, ou seja, com movimento, é necessária a aplicação de um material com flexibilidade, isto é, com elevada capacidade de deformação após o endurecimento [33], como é o caso das resinas de poliuretano e resinas acrílicas.

A **presença de água** irá também afectar a escolha do material a injectar na reparação, devido às reacções químicas (expansivas) de certos materiais com as moléculas de água e à aderência (ou falta da mesma) dos materiais ao betão com a fenda húmida ou molhada. As resinas de poliuretano e acrílicas são as mais indicadas para a reparação de fendas com água, visto as resinas epoxídicas comuns não aderirem a superfícies molhadas, apesar de garantirem a impermeabilidade das estruturas após endurecimento.

As características e propriedades dos materiais, que levam à escolha dos mesmos para as variadas reparações e condições das fissuras, serão detalhados nas secções seguintes.

4.4.1 Materiais resinosos

Actualmente, as resinas são o principal material utilizado nos sistemas de injeção para reparação de fendas. Os produtos de injeção à base de resinas podem ser a mistura de (i) dois componentes (por norma resina líquida e endurecedor) ou de (ii) quatro componentes (normalmente uma “parte A”, mistura de resina líquida e endurecedor pré-doseados em fábrica e uma “parte B”, com acelerador misturado com água). Se o tempo de reacção (endurecimento) dos produtos descrito nas respectivas fichas técnicas for considerado muito longo ou muito rápido, poderão, em certos casos, ser utilizados aditivos para alterar a velocidade de reacção dos produtos.

A mistura dos componentes pode ser feita (previamente num recipiente e o produto injectado por bomba monocomponente ou directamente no equipamento de injeção (bomba bicomponente), dependendo das propriedades e tempos de reacção dos produtos, como será especificado na secção *4.5 Equipamentos de injeção*.

Tendo em conta as propriedades gerais dos materiais resinosos usados como produtos para sistemas de injeção, as principais vantagens são a óptima aderência às superfícies de betão, a gama de viscosidades muito diferentes (grande variedade) e boa trabalhabilidade dos produtos, o rápido endurecimento e a retracção muito reduzida, a impermeabilidade, a estabilidade física e a resistência química [32].

Apesar das muitas vantagens das propriedades dos produtos à base de resinas utilizados nos sistemas de injeção, considera-se ainda assim importante focar três aspectos menos positivos destas soluções, sendo eles a muito baixa resistência a temperaturas elevadas, o *pot life* muito variável consoante o produto, diminuindo com a temperatura (reação exotérmica) e variando com a quantidade misturada, bem como o facto de não se dever exceder 15% da tensão de rotura para tensões permanentes (susceptibilidade à viscoelasticidade) [11].

4.4.1.1 Resinas epoxídicas

As resinas de base epoxídica possuem elevadas resistências mecânicas à compressão e à tracção em relação ao betão, isto é, se a estrutura tornar a fendilhar, as fendas ocorrerão no betão e não na resina. Sendo um material rígido (sem flexibilidade após endurecimento), são utilizadas para reparações estruturais de fendas, assegurando a transferência eficiente das forças e recuperando as condições de rigidez da estrutura [34], devido ao elevado grau de aderência entre a resina epoxídica e o betão.

Num estudo de Issa e Debs [2] verificou-se que as fendas podem causar uma redução na resistência de elementos de betão à compressão até 40,9%, sendo que a utilização de resina epoxídica, quando injectada correctamente, pode restaurar a capacidade resistente do elemento à compressão, diminuindo a redução até 8,2%.

Para além destas principais vantagens, na utilização dos produtos de injeção epoxídicos, tendo em conta as suas características, destaca-se ainda a boa aderência ao aço, o endurecimento sem retracção, a baixa viscosidade, que garante excelente capacidade de penetração nas fendas e vazios, a aplicabilidade a baixas temperaturas e o facto de garantirem uma barreira estanque contra a infiltração de água e penetração de elementos promotores de corrosão [32].

Como aspectos menos positivos ou desvantagens destes produtos, destaca-se o facto de as resinas epoxídicas correntes normalmente serem muito sensíveis à presença de água/humidade. Para além não aderirem a superfícies molhadas ou demasiado húmidas (alguns produtos são aplicáveis a fendas com grau de humidade mínimo), a presença de água ou humidade excessiva pode causar o aparecimento de bolhas nestes produtos, diminuindo consideravelmente as suas resistências mecânicas (segundo Almeida Junior [35], teores de humidade superiores a 15% podem reduzir até 90% as resistências destas resinas).

Os produtos de injeção à base de resinas epoxídicas apresentam ainda um mau comportamento a temperaturas muito elevadas, não devendo ser usados se, posteriormente, a temperatura da estrutura puder atingir 80°C [29] e, por outro lado, sendo rígidos, não são aplicáveis em fendas sujeitas a variações dimensionais significativas [34].

As resinas epoxídicas para injeção de fendas são, por norma, produtos que resultam da mistura de dois componentes, “parte A” e “parte B”, base e catalisador/endurecedor (cujas partes, em peso ou volume, de cada um dos componentes são especificadas nas fichas técnicas e embalagens dos mesmos). Os componentes devem ser misturados num recipiente antes da utilização, momento a partir do qual se inicia a contagem do *pot life*.

Na Tabela 11 detalham-se propriedades relevantes de produtos à base de resinas epoxídicas¹.

Tabela 11 - Propriedades de produtos comuns à base de resinas epoxídicas

Produto	Temperatura da base/ambiente		Viscosidade aproximada (a 20°C)	Tempo de cura (a 23°C)	Pot life* (20°C e aprox. 50% HR)
	Mínima	Máxima			
Epóxi “Tipo A”	5°C	30°C	260 a 430 mPa.s	3/4 h	25 a 70 min
Epóxi “Tipo B”	8°C	35°C	100 a 145 mPa.s	7/8 h	65 a 80 min

*O pot-life também depende das quantidades de produto que tenham sido misturadas. O tempo de vida útil do produto diminui para grandes volumes de mistura. Quando o tempo útil se esgota, o produto reage muito rapidamente com desenvolvimento de calor e fumo (forte reacção exotérmica).

Sendo produtos de muito baixa viscosidade, permitem, teoricamente, penetração em fendas de 0.1 mm ou 0.2 mm em função da viscosidade, mesmo que na prática fendas de 0.1 ou 0.2 mm não tenham expressão suficiente para que seja necessária a sua reparação através de injeção.

Apesar de ser o material mais comum utilizado nos sistemas de injeção, os produtos de resina epoxídica não são capazes de resolver só por si todos os problemas de fendilhação. Se uma fenda estiver reparada, erradamente, com resina epoxídica (solução utilizada diversas vezes em fases mais embrionárias da utilização dos sistemas de injeção), a reparação deve ser removida, caso contrário o betão irá fissurar novamente em zonas adjacentes à fissura anteriormente injectada [33].

¹ Tabela 22 do Anexo E - Produtos com características semelhantes às detalhadas na Tabela 11, e respectivas resistências mecânicas à compressão e tracção.

4.4.1.2 Resinas de poliuretano

As injeções com resinas de poliuretano são injeções flexíveis que garantem uma excelente aderência ao betão, em fendas quer secas, quer húmidas. Estes produtos podem ser usadas em qualquer caso com presença de água, inclusive em locais com pressão hidrostática, bem como em fendas onde haja movimentos, devido à flexibilidade e elasticidade dos produtos com estas resinas de base.

Dentro das resinas à base de poliuretano para injeção de fendas em elementos de betão distinguem-se (i) as resinas de **espuma de poliuretano** e (ii) as resinas de **gel de poliuretano**. Estes dois tipos de resinas apresentam características e, conseqüentemente, funções distintas, mas são geralmente soluções utilizadas em combinação, complementando-se e tirando o melhor partido das propriedades de ambas [31]. As **resinas de espuma de poliuretano** expandem em contacto com a água, sendo usadas em zonas com fluxo de água para estancar temporariamente o seu ingresso através das fendas. A sua rápida reacção expansiva em contacto com a água forma uma espuma flexível e com elasticidade [31]. Para a impermeabilização permanente das estruturas, as fendas injectadas com espuma de poliuretano podem ser reinjectadas com resinas não expansivas [31], como **resinas de gel de poliuretano** hidrofóbicas, flexíveis e de baixa viscosidade, garantindo uma reparação elástica durável, que pode ser solução quer para zonas húmidas, quer para zonas secas.

Em resumo, caso haja água a percolar, com pressão, nas fendas, deve ser usada inicialmente uma resina de **espuma de poliuretano** para estancar a penetração da água, ficando assim as fendas húmidas, com água sem pressão ou secas, permitindo a injeção permanente da resina de **gel de poliuretano** através dos mesmos tubos de injeção, com garantias de excelente aderência ao suporte e entre os dois produtos resinosos.

Resinas de espuma de poliuretano

As resinas de espuma de poliuretano² (Figura 24) são normalmente resinas bicomponentes que, quando misturadas (em quantidades definidas nas fichas técnicas dos produtos), reagem em contacto com a água aumentando a viscosidade e provocando uma expansão de até 40 vezes o seu volume original, formando uma estrutura de poros abertos interligados que pode estancar em segundos o fluxo de água [30].

² Tabela 23 do Anexo E - Produtos de espumas de gel de PU.



Figura 24 - Resina de espuma de poliuretano após expansão (sem confinamento) [35]

O tempo de reacção (formação da espuma) é um conceito muito importante na descrição destes produtos, influenciado pela quantidade de água em contacto com a mistura, bem como pela temperatura do material misturado e do suporte. Se o tempo de reacção do produto for considerado muito longo, poderão ser utilizados aditivos (aceleradores) para acelerar a velocidade de reacção dos mesmos em contacto com a água, sendo colocados por norma 1% a 10% de acelerador, consoante o peso da mistura.

Existe uma vasta gama de combinações de características dos produtos, dependendo dos três factores já referidos: quantidade misturada de cada componente, quantidade de água e quantidade de acelerador. As fichas técnicas dos produtos fornecem tabelas com as combinações possíveis, podendo ser atingidos, usando aceleradores, tempos mínimos (i) menores que 10 segundos, para o início da reacção e (ii) menores que 35 segundos, para o fim da expansão.

Embora pouco comercializados, existem ainda produtos de resinas de **espuma de poliuretano rígidos** que recompõem o monolitismo das estruturas em fissuras com presença de água, inclusive com fluxo intenso [37]. Estes produtos são hidroreactivos e rígidos (alguma rigidez mas não comparável à dos produtos de resina epoxídica), para reparações de carácter estrutural em fissuras com água ou humidade excessiva. Não necessitando de mistura com qualquer outro produto, são somente resinas bicomponentes que podem atingir até 40 MPa de resistência à compressão. A diferença entre estes produtos de poliuretano rígidos e os à base de resinas epoxídicas, é que os primeiros podem ser usados em estruturas mesmo com fluxo de água, ao passo que os segundos somente podem ser usados em zonas secas ou com humidade ligeira (como referido anteriormente), mas conseguindo atingir resistências mecânicas mais elevadas após endurecimento (na ordem dos 80 MPa [37]).

Resinas de gel de poliuretano

Como referido, as resinas de gel de poliuretano são produtos que podem ser injectados em fendas secas, húmidas ou com água sem pressão, com elevada resistência química, utilizados em várias situações para impedir o ingresso de substâncias agressivas no interior das estruturas. O termo gel sugere um material em suspensão coloidal disperso em água, que se polimeriza formando uma espécie de “gelatina”. São então sistemas flexíveis (alongáveis e compressíveis) e são materiais recomendáveis para o preenchimento permanente de fendas com abertura variável ao longo do tempo (fissuras activas), adaptando-se aos seus movimentos, com aberturas mínimas na ordem dos 0.2 mm, estando estimado ao fim de 40 anos, em ambientes altamente alcalinos, os produtos mantêm a elasticidade [36].

Na Tabela 12 detalham-se propriedades relevantes dos produtos mais usuais à base de gel de poliuretano³.

Tabela 12 - Propriedades de produtos comuns à base de resinas de PU

Produto	Temperatura da base/ambiente		Viscosidade aproximada (a 20°C)	Tempo de reacção (aprox. sem acelerador)		
	Máxima	Mínima		5°C	10°C	20°C
Gel PU “Tipo A”	5°C	30°C	100 mPa.s	180 min	180 min	135 min
Gel PU “Tipo B”	5°C	30°C	180 mPa.s	90 min	90 min	70 min

Tal como para as de espumas de poliuretano, as fichas técnicas dos produtos que formam gel de poliuretano fornecem tabelas com as combinações possíveis, podendo ser atingidos, usando aditivos (aceleradores), tempos de presa mínimos de aproximadamente 5 minutos.

4.4.1.3 Resinas acrílicas

As resinas acrílicas são hidrofílicas, muito flexíveis e usadas para injeções não estruturais de fendas [31]. Estes produtos caracterizam-se por um material muito elástico e apresentam uma viscosidade extremamente reduzida (quase semelhante à da água), tendo propriedades ideais de penetração nos vazios das estruturas, podendo ser injectados em fendas menores que 0.05 mm, ou mesmo através de solos siltosos e arenosos [36].

³ Tabela 24 do Anexo E - Produtos com características semelhantes às detalhadas na Tabela 12.

A sua aplicação é comum no uso de técnicas de cortinas de injeção (Figura 25) como solução de reparação de outros sistemas de impermeabilização ou como impermeabilização de prevenção em muros de contenção de estruturas enterradas, formando uma barreira entre o solo e o lado exterior da estrutura.



Figura 25 - Injecção de resina acrílica em cortina de impermeabilização [15]

Os produtos à base de gel acrílico apresentam boa aderência ao betão (e rocha) húmido ou saturado em água, e são capazes de se expandir até 200% [36]. Sendo produtos com elevada elasticidade, adaptam-se bem a fendas com movimento (grandes oscilações), sendo uma boa solução para fendilhação intensa com presença de água ou juntas de dilatação de estruturas de betão que necessitem de reparação muito flexível. Este tipo de produtos são normalmente bicomponentes, compostos pela base de resina, catalisador/endurecedor e polímero acrílico em solução aquosa (pó polimérico misturado com água), e apresentam tempos de reacção muitíssimo reduzidos, não podendo ser misturados em recipiente antes da injeção.

Na Tabela 13 apresentam-se as propriedades mais relevantes dos produtos comuns à base de gel de poliuretano⁴.

Tabela 13 - Propriedades de produtos comuns à base de resinas de gel acrílico

Produto	Temperatura da base/ambiente		Viscosidade aproximada (a 20°C)	Tempo de reacção*	
	Máxima	Mínima		10°C	20°C
Gel Acrílico "Tipo A"	5°C	25°C	7 mPa.s	80 seg	40 seg
Gel Acrílico "Tipo B"	5°C	40°C	5 mPa.s	24 seg	15 seg

*Aproximado, com 5% de solução em água

Os produtos à base de resinas de gel acrílico após a cura devem ficar em contacto directo e permanente com bases húmidas ou saturados em água de modo a manterem as suas propriedades após reacção.

⁴ Tabela 25 do Anexo E - Produtos com características semelhantes às detalhadas na Tabela 13.

Embora ainda sejam produtos com muito pouca expressão, existem já resinas de base acrílica de reacção com o latex [38], que confere grande flexibilidade e elasticidade aos produtos e excelentes garantias de impermeabilização das estruturas.

4.4.2 Materiais cimentícios

Os materiais cimentícios utilizados para injeção, também usualmente denominados de *grouts*, são os materiais menos usuais nas tecnologias de reparação de fendas. Os produtos são compostos de água, cimento e polímeros modificados usados para sistemas rígidos de injeção. Os *grouts* não são materiais flexíveis e, conseqüentemente, não se adaptam a movimentos das fendas, sendo usados para trabalhos de injeção estrutural para recomposição de monolitismo em estruturas com fendas passivas e de grandes dimensões.

Segundo [32], podem distinguir-se os produtos de injeção de origem cimentícia em:

- Caldas de cimento - cimento comum bastante fluído, com tamanhos de grão na ordem dos 100 μm (0,1 mm);
- Microcimentos - a quantidade dos grãos mais finos de cimento, variável entre 8 μm e 50 μm , é de 95%.

4.4.2.1 Caldas de cimento

As caldas de cimento são uma solução muito pouco frequente no âmbito das soluções para injeções de fendas, entrando já na reparação de outras anomalias, como enchimentos de vazios e zonas porosas, descasques no betão ou como solução de injeção em bainhas de pré-esforço. Assim, na presente secção apenas serão focados os *grouts* de microcimento, mais utilizados em produtos para sistemas de injeção.

4.4.2.2 Grouts de microcimento

Os *grouts* de microcimento, como foi referido, não são flexíveis e, conseqüentemente, não se acomodam a movimentos das fissuras [36]. Estes materiais cimentícios especiais para injeções, compostos com polímeros modificados, podem ter excelente trabalhabilidade, assim como boas características de penetração [36]. Podem ser usados em trabalhos de injeção para reparação estrutural de fendas (superiores a 0.5 mm [37]) ou vazios, mas são mais correntemente usados no tratamento de juntas estruturais, não sendo produtos com grande procura para injeções comuns de fendas, pois a sua penetrabilidade (pior viscosidade) é inferior à dos produtos para injeção à base de resinas epoxídicas, bem como as suas características mecânicas (sendo, por isso, mais comum e uma melhor solução optar por injeções de produtos epoxídicos em reparações de fendas de carácter estrutural).

Estes produtos têm como principais vantagens o facto de serem insensíveis ao nível de humidade das estruturas de betão e da pasta de microcimento ser composta por cimentos especiais para injeção, conferindo rigidez aos elementos. Como desvantagem, inerente aos materiais cimentícios, destaca-se a retracção durante os processos de cura e endurecimento, apesar de existirem produtos com retracção compensada através do uso de aditivos.

Na Tabela 26 do *Anexo E* apresentam-se os produtos de injeção mais comuns à base de microcimentos disponíveis no mercado.

Em seguida, na Tabela 14 apresentam-se as soluções mais adequadas conforme a reparação seja ou não estrutural e em função da humidade das fendas.

Tabela 14 - Materiais a utilizar nos sistemas de injeção em função da humidade da fenda a ser preenchida

	Seca ⁵	Húmida	Infiltração s/ pressão	Infiltração c/ pressão ⁶
OBJECTIVO	MATERIAL A INJECTAR			
Reparação flexível	Resina gel poliuretano	Resina gel poliuretano Resina acrílica	Resina gel poliuretano Resina acrílica	Espuma poliuretano + Resina gel poliuretano ou Resina acrílica
Reparação estrutural	Resina epoxídica <i>Grout</i> cimentício	<i>Grout</i> cimentício	Espuma poliuretano rígido (+ Resina epoxídica ⁷) <i>Grout</i> cimentício	Espuma poliuretano rígido (+ Resina epoxídica ⁷)

⁵ Considera-se a fenda “seca” para humidade até 6% [36].

⁶ Além de medidas para reduzir a pressão da água, como as perfurações para aplicação dos injectores mecânicos ou “perfurações de alívio”, deve sempre ser usada espuma de PU injectada, se possível, na face em contacto com a água para parar/reduzir o fluxo de água [32].

⁷ A injeção de resina epoxídica como meio de recuperar a integridade da estrutura é a solução ideal desde que a base se encontre seca ou com um grau de humidade mínimo. No entanto, caso se trate de uma fenda com fluxo de água, para estancar a água aplica-se espuma de PU e posteriormente uma injeção de resina epoxídica. Estas não são as condições “perfeitas”, visto que se preenche o vazio com a espuma de poliuretano que irá ocupar o espaço necessário para a resina de epoxídica estrutural, no entanto, caso não exista uma outra solução de estancar o fluxo de água, esta será a única hipótese.

Sintetizando, de um modo geral, entre os materiais utilizados para a reparação de fendas por injeção em elementos de betão, podem distinguir-se:

- Materiais que permitem a **transmissão de esforços através das fendas e defeitos**. Ligam as faces da fenda possibilitando a transmissão de tensões, sendo materiais rígidos após endurecimento. Incluem-se neste grupo as resinas epoxídicas e os *grouts* de microcimentos.
- Materiais com **comportamento flexível após o endurecimento** (elevada capacidade de deformação). Permitem preenchimento permanente das fendas e absorvem os movimentos após a injeção. Este grupo inclui as resinas de gel de poliuretano e de gel acrílico.
- Materiais que **expandem em contacto com a água** permitindo um preenchimento eficaz das fendas com infiltração de água com pressão estancando o fluxo de água. Neste grupo incluem-se as resinas de espuma de poliuretano.

4.5 Equipamentos de injeção

A escolha adequada do equipamento para injeção do produto selecionado é o segundo factor-chave para o sucesso da reparação [31].

Os equipamentos usados em cada reparação dependem muito do empreiteiro e do volume da obra, mas a utilização de **bombas de injeção** e de **injectores** (bicos de injeção) é comum a todos os trabalhos de injeção de fissuras. Os tipos de bombas e injectores escolhidos dependerão dos produtos a injectar, da pressão de injeção e da qualidade do betão na envolvente das fissuras, como será detalhado em seguida.

4.5.1 Bombas de injeção

As bombas de injeção são equipamentos que permitem a aplicação de uma vasta gama de produtos, estando aptas para a injeção de produtos à base de resinas epoxídicas, resinas de poliuretano, resinas acrílicas e microcimentos.

Existem duas tecnologias de bombas para injeção de resinas e microcimentos (i) bombas monocomponentes e (ii) bombas bicomponentes. As bombas monocomponentes são as mais utilizadas, tendo como vantagem o custo mais reduzido, visto que requerem ao empreiteiro um investimento equivalente a uma fracção do preço de uma bomba bicomponente [31]. No entanto, as bombas bicomponentes são a única opção para injeção rápida de resinas de rápida reacção ou com cura ultrarrápida (algumas resinas acrílicas), e são indicadas também para casos onde é necessário injectar grandes quantidades de material (como é o caso de cortinas de impermeabilização com resina acrílica).

Nas **bombas monocomponentes** é depositado no recipiente de armazenamento da bomba o produto dos dois componentes (produtos monocomponentes - resina + endurecedor, como descrito na secção 4.4 *Caracterização geral dos materiais para produtos de injeção*) misturados *a priori*. O tempo de trabalho do produto tem início após a mistura dos componentes, sendo necessário aplicar o volume completo da mistura dentro do *pot life* indicado na ficha técnica do produto.

Existem três tipos de tecnologias de bombas monocomponentes, podendo estas ser:

- Manuais;
- Pneumáticas (bombas a ar comprimido);
- Eléctricas (bombas de membrana).

Os equipamentos de injeção variam consoante o fabricante, mas as utilizações e características são semelhantes e bastante universais.

Os **equipamentos manuais de injeção** disponíveis são as bombas (Figura 26) ou pistolas manuais (Figura 27) para injeção fácil de resinas a baixa pressão. O equipamento manual de injeção não é mais que uma bomba de “massa consistente” e é um tipo de equipamento simples, e logicamente, apropriado para pequenos trabalhos.



Figura 27 - Bomba de injeção manual [15]



Figura 26 - Pistola de injeção manual [15]

O caudal máximo aproximado deste tipo de equipamento é de cerca de 0,030 litros por cada bombada, injectando resinas até pressões máximas de 100 bar⁸.

As bombas monocomponentes são normalmente eléctricas e apropriadas para a aplicação de uma vasta gama de produtos: resinas epoxídicas, resinas de poliuretano, resinas acrílicas e microcimentos. Dentro das **bombas eléctricas**, distinguem-se as bombas para injeção de resinas e para injeção de microcimentos. Para injeção de resinas existem dois tipos de bombas (Figuras 28 e 29), cuja gama de características técnicas dos equipamentos são detalhadas na Tabela 15.

⁸ Características correspondentes a equipamentos SIKA (*Sika Injection Pump Hand-1* e *Sika Injection Pump Hand-2*) com características técnicas semelhantes a equipamentos fornecidos por outras marcas.



Figura 28 - Bomba eléctrica monocomponente comum para injeção de resinas [15]



Figura 29 - Bomba eléctrica monocomponente de "pequena dimensão" para injeção de resinas [15]

As bombas eléctricas para injeção de grouts cimentícios (Figura 30) permitem a injeção de produtos com partículas na ordem dos 0.3 mm de dimensão máxima, e garantem a bombagem contínua sem promover separação dos materiais constituintes do produto de injeção. As características técnicas deste equipamento são também detalhadas na Tabela 15.



Figura 30 - Bomba eléctrica monocomponente para injeção de grouts [15]

Para a mistura completa e exaustiva dos produtos cimentícios de injeção, é necessário um **misturador coloidal** (Figuras 31 e 32) como complemento à bomba de injeção, para garantir a homogeneidade do produto.



Figura 32 - Misturador coloidal [15]



Figura 31 - "Cabeça" do misturador coloidal [15]

Tabela 15 - Características técnicas comuns das bombas monocomponentes eléctricas⁹

Propriedade	Bomba "pequena dimensão" injeção de resinas	Bomba injeção de resinas	Bomba injeção de grouts
Pressão de serviço (bar)	0-150	0-250	2-20
Caudal máximo (l/min)	1,6	2,5	8,5
Peso total aproximado (kg)	18	24	55
Comprimento da mangueira (m)	3	3	5

As **bombas bicomponentes** têm dois recipientes de armazenamento, sendo cada um preenchido com uma "parte" do produto (sendo cada "parte" a mistura de dois componentes, como descrito na secção 4.4 *Caracterização geral dos materiais para produtos de injeção*). A mistura dos dois componentes do produto é feita apenas no momento da injeção quando os componentes são bombeados através da cabeça de mistura (Figura 33). O *pot life* do produto começa a contar aquando da mistura dos componentes, sendo as bombas bicomponentes usadas para injeção de resinas de rápida reacção [31].

As bombas bicomponente são usualmente pneumáticas, isto é, com fornecimento de ar por compressor (ar comprimido). Existem bombas bicomponentes desenhadas especificamente para cada tipo de resina de injeção devido aos diferentes valores de viscosidades, razão de mistura, tempos de reacção, etc. [31], sendo que são usadas mais frequentemente para injeção de resinas acrílicas de rápida reacção (rápida formação de gel) – Figura 34.

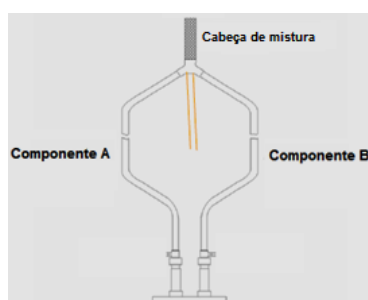


Figura 34 - Mistura dos dois componentes de um produto de injeção - Bomba bicomponente (adaptado de [15])



Figura 33 - Bomba para injeção de produtos acrílicos de 2 componentes [15]

⁹ Características correspondentes a equipamentos SIKA (respectivamente: *Sika Injection Pump EL-1*, *Sika Injection Pump EL-2* e *Sika Injection Pump MFC-1*) com características técnicas semelhantes a equipamentos fornecidos por outras marcas.

Tabela 16 - Características técnicas comuns de bombas bicomponentes para injeção de produtos acrílicos¹⁰

Pressão de serviço (bar)	0-200
Caudal máximo (l/min)	8,0
Peso total aproximado (kg)	50
Comprimento da mangueira (m)	5

Para além das mais comuns bombas bicomponentes para injeção de resinas acrílicas, existem também bombas bicomponentes pneumáticas que podem injectar com sucesso grandes volumes de resinas bicomponente de poliuretano e epoxídicas.

Tabela 17 - Tipos de utilização mais comuns das diversas bombas em função dos diferentes produtos de injeção (adaptado de [31])

Produto	Bomba monocomponente	Bomba bicomponente	Bomba de vácuo
Resinas epoxídicas	X		
Resinas de poliuretano	X	X	
Resinas acrílicas	X	X	X
Grouts	X		X

As bombas devem assegurar uma pressão constante de injeção bem como o ajuste da mesma durante os trabalhos. A pressão de injeção utilizada dependerá da espessura, da profundidade da fenda e do material escolhido para a reparação. A injeção a baixa pressão, entre 1 e 10 bar, é normalmente realizada com bombas de membrana para reparação de fendas com aberturas com alguma expressão e profundidade reduzida. Pressões muito elevadas são usadas na reparação de fendas de abertura mais reduzida (normalmente entre 0.05 mm a 0.4 mm), quando é necessária maior pressão para que a resina penetre em profundidade, devendo sempre ter-se em atenção que se for usada uma pressão muito alta, se se tratar de um elemento em betão muito afectado, pode levar ao destacamento e danificação do elemento na zona injectada.

¹⁰ Características correspondentes a equipamento SIKA (*Sika Injection Pump PN-2C*) com características técnicas semelhantes a equipamentos fornecidos por outras marcas.

4.5.2 Bicos de injeção

Também designados como *packers*, os injectores são bicos de injeção que funcionam como válvulas de enchimento e peças de conexão entre o equipamento de injeção e a estrutura. Podem distinguir-se em dois tipos (i) injectores de superfície e (ii) injectores mecânicos.

Os **injectores de superfície** (Figura 35) são válvulas de enchimento de plástico ou metal, que são instalados sobre a fenda, à superfície da estrutura. Estes bicos de injeção são geralmente usados para a injeção de resinas epoxídicas, ou seja, onde é necessário um reforço estrutural [15] e são adequados em situações onde não é aconselhável furar o betão [31], como será detalhado em seguida na secção 4.6 *Métodos de injeção*. Existem ainda injectores simples que sendo semelhantes aos injectores de superfície diferenciam-se pelo facto de não terem a base do injector e serem inseridos dentro da fissura, sem recurso a equipamento mecânico.



Figura 35 - Injector de superfície [15]

Os **injectores mecânicos** têm forma cilíndrica, são instalados após a furação da estrutura e de seguida apertados obrigando a borracha que contém a “inchar” contra a parede do furo para segurar o injector de maneira a suportar a injeção a elevada pressão [42]. O método de injeção será também detalhado seguidamente na secção 4.6 *Métodos de injeção*.

Tal como nas bombas de injeção, os injectores diferenciam-se de fornecedor para fornecedor, mas as características base são comuns e de certa forma universalizadas. Distinguem-se então três tipos: *packers* usuais para injeções comuns de resinas (Figura 36), *packers* que podem ser equipados com válvulas para pressões maiores (Figura 37) e injeções em cortina e *packers* especialmente indicados para injeções de microcimentos (Figura 38).



Figura 36 - Injector mecânico comum para injeção de resinas [15]



Figura 37 - Injector mecânico para injeção de resinas recomendado para altas pressões e altos fluxos de material a injectar [15]



Figura 38 - Injector mecânico com cabeça em plástico para injeção de microcimentos [15]

O encaixe dos injectores varia também consoante o fabricante e a bomba de injeção. Quanto à geometria os *packers* para injeção de resinas podem variar entre 70 mm e 150 mm de comprimento e 8 mm e 19 mm de diâmetro, enquanto os *packers* para injeção de microcimentos têm normalmente 100 mm de comprimento e 13 mm de diâmetro¹¹. Estas características são adaptáveis e podem ser fornecidos pelas marcas injectores com dimensões diferentes em função de cada situação, tendo em conta a profundidade da fenda, material a injectar e pressão de injeção.

4.6 Métodos de injeção

O método de injeção é o terceiro factor-chave para o sucesso da reparação. As técnicas utilizadas para a aplicação dos produtos de injeção devem ser implementadas de modo a garantir os requisitos de preenchimento permanente das fissuras [31].

Existem duas abordagens comuns quanto ao tipo de injeção:

- Injeção sob pressão - o material de injeção é colocado sob pressão (alta ou baixa) através de injectores na zona superficial da fenda ou inseridos através de furos laterais intersectando a fenda;
- Injeção superficial com vácuo (muito raro) - a zona a injectar é sujeita a vácuo e o material é colocado posteriormente sob pressão.

Apesar da possibilidade de **injeção por vácuo**, na prática torna-se muito raro, devido à dificuldade de conseguir vácuo num elemento de betão armado com várias fendas, além de ter custos muito elevados.

A **injeção sob pressão** é o método mais comum na reparação de fendas, podendo consistir na injeção directa da fenda com injectores de superfície ou na injeção com injectores mecânicos através de furos feitos com brocas, sendo a segunda a técnica mais eficaz no preenchimento de todos os vazios. Ambas as técnicas são ilustradas em seguida, sendo também descrito o correcto procedimento de injeção.

¹¹ Características correspondentes aos equipamentos *Sika Mechanical Packers MPS*, *Sika Mechanical Packers MPR* e *Sika Mechanical Packers MPC*, respectivamente.

4.6.1 Injecção sob pressão directamente na fenda

Este método com injectores colocados na superfície da fenda deve ser utilizado quando não é possível furar o betão, não existe infiltração na fenda e a injecção é a baixa pressão (inferior a 20 bar).

Na Figura 39 apresenta-se um esquema deste método de injecção através de injectores de superfície colocados sobre a fenda.

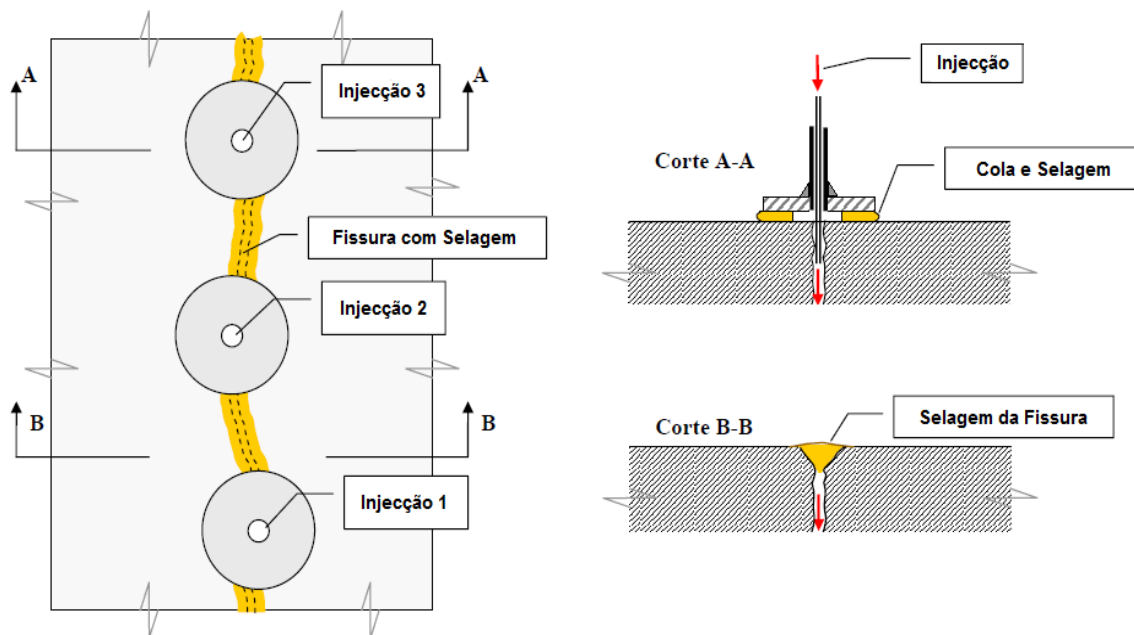


Figura 39 - Injecção com injectores de superfície (adaptado de [32])

Durante a instalação, deve inserir-se um prego no injecção de maneira a que o canal de injecção não fique bloqueado com o material previamente aplicado. Assim que o material curar, deve retirar-se o prego [31]. Deve ainda ser usado um purgador para permitir a saída de ar e para facilitar o fluxo do material [32].

4.6.2 Injecção sob pressão através de furos feitos com brocas

Este tipo de injecção com injectores colocados mecanicamente por furação é o método mais comum e eficaz. Porém tal aplicação dos injectores só é possível quando se pode furar o betão (betão em boas condições e zona sem risco de danificar as armaduras) [31], sendo possível injectar a baixa ou alta pressão.

Como mostra a Figura 40, o betão deve ser perfurado e os injectores devem ser colocados atravessando a espessura da fenda.

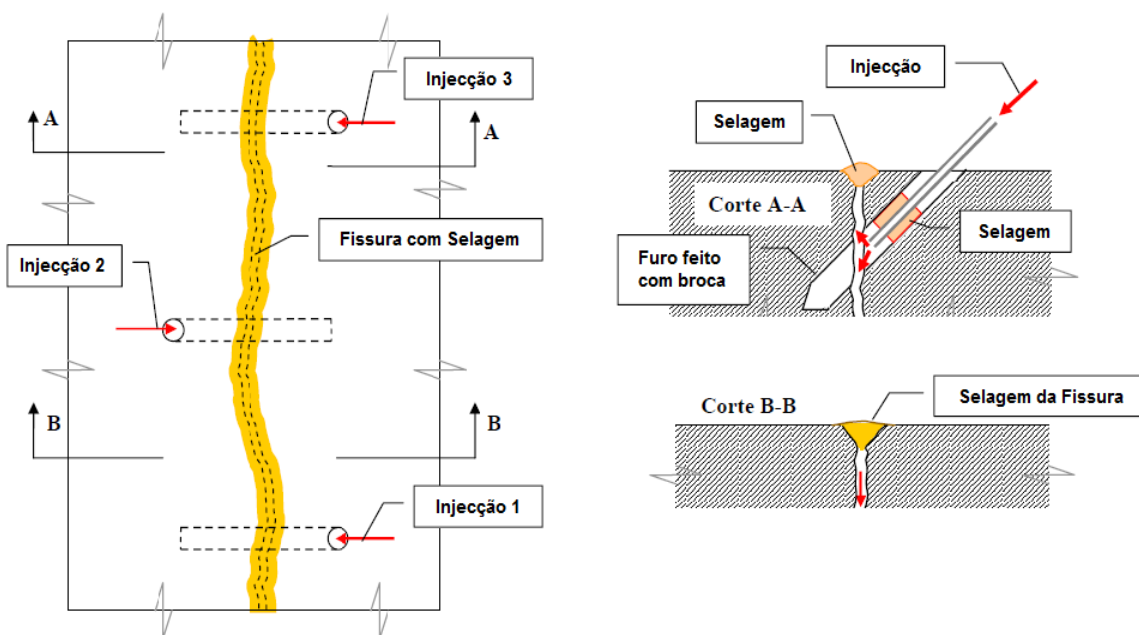


Figura 40 - Injecção com injectores mecânicos (adaptado de [32])

Como pormenoriza o *Corte A-A* da Figura 40, a borracha do injector, ao ser apertada, sela qualquer falha ou buraco que possa existir; como tal, não existe a possibilidade de haver fuga de material.

A injeção pode ser feita a baixa ou alta pressão, no entanto, este método é mais recomendado para injeção a alta pressão, pois tal garantirá o preenchimento de todos os vazios. A pressão de injeção não deve exceder um terço da resistência característica do betão (f_{ck}), sendo a pressão usual de injeção entre 0,5 a 1,0 MPa [32].

O comprimento do injector deve ser escolhido de maneira a que a válvula anti-retorno possa ser facilmente instalada ou retirada do injector. Tal como na injeção com injectores de superfície, deve ainda ser usado um purgador para permitir a saída de ar e para facilitar o fluxo do material.

4.7 Procedimentos e controlo de qualidade da injeção

4.7.1 Procedimento de injeção

Para a garantia da qualidade da reparação, o procedimento de injeção deve ser rigoroso seguindo os passos que se descrevem em seguida.

Para ambos os métodos de injeção sob pressão descritos anteriormente, a primeira medida passa pela limpeza e tratamento da fenda. Isto implica:

- Remoção do betão desagregado na zona da fenda (caso exista);
- Alargamento da abertura superficial (em V) em todo o comprimento da fenda com martelo pneumático, disco de coroas diamantadas, escopro ou outro equipamento;
- Limpeza do pó e detritos com jacto de água seguido de secagem com ar quente, ou, em alternativa, com jacto de ar comprimido.

Em trabalhos de **injeção sob pressão com injectores de superfície**, a sequência dos procedimentos deve ser a seguinte:

1. Aplicação dos bicos de injeção, metálicos ou de plástico, com espaçamento em função da largura da peça a reparar (normalmente distância entre furos igual à espessura do elemento de betão a injectar, como mostra a Figura 41), abertura e profundidade das fendas, eventuais bifurcações, viscosidade da resina e pressão de injeção;
2. Selagem da superfície longitudinal da fenda, para o material não sair durante a operação de injeção, cobrindo também a base dos injectores de superfície, como mostra a Figura 42;

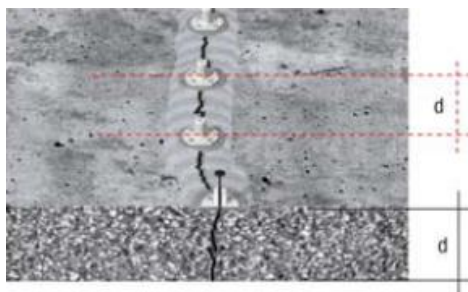


Figura 42 - Aplicação dos injectores de superfície em função da espessura da peça de betão [15]

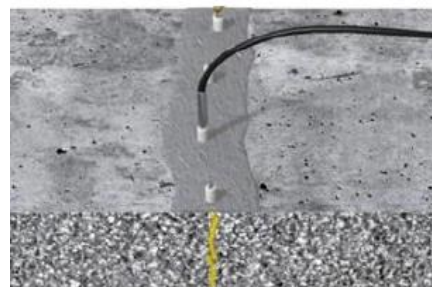


Figura 41 - Fissura selada pronta para injeção com injectores de superfície [15]

3. Verificação de eventuais obstruções entre bicos de injeção e também da efectividade da selagem com ar comprimido através da mangueira de injeção;
4. Preparação do material de reparação com equipamento próprio consoante o produto e as características da mistura e ajuste da mangueira de injeção aos bicos de injeção;

5. Injecção do produto de reparação (aconselhável 24 horas após selagem, mas variável dependendo do produto usado para selar a fenda¹²) tendo em conta boas práticas como:
 - Deve ser mantida pressão máxima definida durante alguns minutos para material chegar às zonas mais estreitas da fenda;
 - A pressão de injecção não pode exceder a resistência da selagem superficial;
 - Deve ser verificado se existem consumos excessivos (anormais) de resina.
- 5.1. Em fendas verticais, início da injecção no furo inferior passando-se para o seguinte quando este purga material, ou seja, injecção de baixo para cima. Em fendas horizontais, início da injecção por um furo central e injecção alternada nos furos contíguos, ou divisão em dois troços (para cada lado do furo central);
- 5.2. Quando o material de injecção escoar para fora do segundo bico, paragem da injecção no primeiro bico passando a mangueira para o segundo, continuando o procedimento sucessivamente até ao último bico de injecção.
6. Corte da cabeça dos injectores, colmatação dos furos com cera de parafina ou com o próprio material de injecção e reparação/alisamento das superfícies (normalmente após 12 a 24 horas).

A **injecção sob pressão com packers mecânicos** dispensa normalmente o alargamento da fissura e a selagem da mesma, a não ser que os injectores atravessem a fenda muito junto à superfície do betão, como se mostrou anteriormente na Figura 40, ou se trate de injecção rígida de resina epoxídica difícil de regularizar se houver fuga do material para o exterior da superfície (ao contrário de injecções de resinas de poliuretano ou acrílicas que, não sendo tão rígidas após endurecimento, podem ser “limpas” no final da injecção, se segregarem para zonas indesejadas).

O procedimento aconselhado para este tipo de injecção deve seguir os passos que se enumeram:

1. Furação de ambos os lados da fenda, alternadamente, com um ângulo de aproximadamente 45° em relação a superfície do betão e com espaçamento em função da largura da peça a reparar (normalmente distância entre furos correspondente a metade da espessura do elemento de betão, como mostra a Figura 43), abertura e profundidade das fendas, eventuais bifurcações, viscosidade da resina e pressão de injecção. O diâmetro do furo deve ser 1 ou 2 mm superior ao diâmetro do injector. O comprimento dos injectores deve ser escolhido de maneira a que a válvula anti-retorno possa ser facilmente instalada ou retirada do injector.
2. Instalação e aperto dos injectores mecânicos para que possam resistir à máxima pressão de injecção, como ilustra a Figura 44;

¹² O material utilizado na selagem das fendas é normalmente argamassa misturada com polímeros (frequentemente argamassa epoxídica).

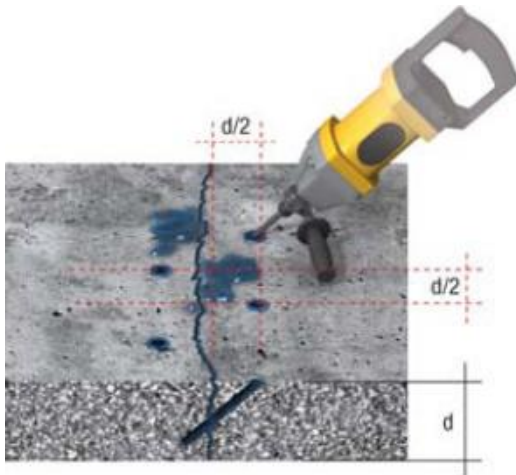


Figura 43 - Furação para aplicação de injectores mecânicos em função da espessura da peça de betão [15]



Figura 44 - Aplicação e aperto dos injectores mecânicos [15]

3. Verificação de eventuais obstruções entre bicos de injeção e também da efectividade da selagem (se executada) com ar comprimido;
4. Preparação do material de reparação, mistura com equipamento próprio consoante o produto e as características da mistura e ajuste da mangueira da bomba de injeção aos *packers*;
5. Injeção do produto de reparação (se a fenda for selada aconselhável 24 horas após selagem, mas variável dependendo do produto usado para selar a fenda) tendo em conta as boas práticas referidas anteriormente.
 - 5.1. Em fendas verticais, início da injeção no furo inferior passando-se para o seguinte quando este purga material, ou seja, injeção de baixo para cima. Em fendas horizontais, início da injeção por um furo central e injeção alternada nos furos contíguos, ou divisão em dois troços (para cada lado do furo central);
 - 5.2. Quando o material de injeção escoar para fora do segundo bico, fecho da válvula de retorno o mais rápido possível parando a injeção no primeiro bico e continuando no segundo, repetindo o procedimento até ao último injetor.
6. Remoção dos injectores ou corte dos injectores a superfície com rebarbadora, colmatação dos furos com cera de parafina ou com o próprio material de injeção e reparação/alisamento das superfícies (normalmente após 12 a 24 horas).



Figura 45 - Injecção de resina de espuma de poliuretano com injectores mecânicos [15]

Em todos os trabalhos de injeção é de extrema importância que os componentes sejam previamente muito bem misturados, e com aparelhagem adequada, para não ocorrer a segregação dos componentes da mistura aquando da injeção.

4.7.2 Controlo de qualidade da injeção

Para garantia da qualidade do produto é boa prática avaliar a mistura quanto à uniformidade da cor ou homogeneidade, antes da injeção. Com maior rigor, no início de cada ciclo de injeções pode ser vertida uma pequena amostra de resina para um copo ou recipiente de ensaio e usar essa amostra para verificar se há uniformidade de cor e executar um teste de dureza após algum endurecimento, se necessário [33].

Após a conclusão dos trabalhos de reparação, para a verificação da eficiência da injeção pode recorrer-se a extracção de carotes cilíndricas (Figura 46), com diâmetros variáveis a definir entre os empreiteiro e o dono de obra/fiscalização.



Figura 46 - Carotes cilíndricas extraídas de estrutura de betão fendilhada [6]

Pode também recorrer-se ao ensaio de ultra-sons (detalhado anteriormente em 2.3.3 *Técnicas de inspeção e monitorização de fendas em betão*), de modo a avaliar a penetração da resina, considerando-se satisfatória se o preenchimento atingiu pelo menos 90% da profundidade da fenda [6].

Para além dos ensaios que podem ser feitos após a injeção, para avaliar a qualidade da reparação, antes da execução dos trabalhos, é muito importante analisar com detalhe as fichas técnicas dos produtos e equipamentos que irão ser utilizados, bem como as fichas de dados de segurança dos produtos de injeção.

4.8 Considerações finais – Tabela síntese

Os sistemas de injeção são soluções consagradas há mais de 40 anos em inúmeras obras em todo mundo [39]. As soluções de reparação recorrendo a sistemas de injeção podem garantir a recomposição estrutural, a funcionalidade, a durabilidade e segurança, sendo soluções eficazes e duradouras para os diversos problemas de fendilhação das estruturas de betão, tanto novas como antigas (manutenção) [30].

Numa fase inicial da reparação de fendas com sistemas de injeção, surgiram muitos debates acerca dos materiais a injectar, principalmente entre o uso de resina epoxídica e resina de espuma de poliuretano, sendo que ambos preenchem e estancam as fendas contra a penetração de água. A questão é simples de responder: o melhor produto a injectar depende do tipo de fenda das suas características ao longo do tempo (actividade) e no momento da reparação (presença de água) [34].

Para os variados casos de fendilhação em estruturas ou elementos de betão, respectivas condicionantes e características do meio e das próprias fendas, existem diversas soluções comprovadas para a reparação das mesmas.

Na Tabela 18 sintetizam-se solução de reparação com utilização de cada tipo de produto à base de resina para casos de fendilhação distintos.

Tabela 18 - Casos comuns para a utilização dos sistemas de injeção à base de resinas (adaptado de [31])

SITUAÇÃO	REQUISITOS DOS MATERIAIS DE REPARAÇÃO	SOLUÇÃO DE REPARAÇÃO
<p>Paredes de contenção em betão armado de piso subterrâneo fendilhadas devido a assentamento da estrutura após construção. Infiltrações de água com pressão no interior da estrutura devido ao contacto com água do solo.</p>	<p>Primeira fase: Resina de injeção reactiva em contacto com a água, com rápida criação de espuma para estancar fluxo de água.</p> <p>Segunda fase: Resina compatível com a espuma previamente injectada, de baixa viscosidade, boa aderência ao betão e com resistência química.</p>	<p>Primeira fase: Injeção de resina de espuma de poliuretano de rápida reacção expansiva em contacto com a água para estancar temporariamente o ingresso de água.</p> <p>Segunda fase: Injeção de resina elástica de gel de poliuretano para estancar permanentemente a entrada de água através da estrutura.</p>
<p>Fendas variadas ao longo das vigas de suporte do tabuleiro de uma ponte em betão armado, com potencial para se tornarem um problema estrutural, devido ao carregamento excessivo proveniente do aumento de tráfego.</p>	<p>Elevada resistência mecânica e aderência ao betão, de maneira a conferir recomposição estrutural à estrutura;</p> <p>Diferentes viscosidades para colmatar as fissuras de abertura variada.</p>	<p>Injeção de resina epoxídica de baixa viscosidade e elevada aderência ao betão (injeção das fendas após selagem das mesmas)¹³.</p>
<p>Túnel em betão armado abaixo do nível freático, com sistema de impermeabilização danificado. Infiltração de águas subterrâneas através de juntas de betonagem e algumas fendas.</p>	<p>Produto elástico, capaz de impermeabilizar permanentemente a estrutura;</p> <p>Viscosidade muitíssimo baixa;</p> <p>Tempo de reacção e trabalhabilidade adaptável a requisitos específicos;</p> <p>Não agressivo para o ambiente.</p>	<p>Injeção em cortina de resina de gel acrílico de cura rápida, para garantia de preenchimento de todos os vazios nos elementos e formação de barreira impermeável elástica na interface entre o solo e a estrutura.</p>

¹³ No caso de reparação estrutural devido a carregamento excessivo a injeção de fendas deve complementar uma intervenção de reforço.

5 Caso de Estudo – Reparação de Túnel em Betão Armado

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo o acompanhamento de uma obra de reparação de um túnel subterrâneo em betão armado com cerca de 8 metros de largura, enquadrando a patologia em foco ao longo de toda a dissertação, a fendilhação, bem como a intervenção através dos sistemas de injeção, respectivos materiais, equipamentos e métodos de reparação descritos no capítulo anterior (*Capítulo 4 – Tecnologias da Reparação de Fendas por Injecção*).

Para além do foco principal na fendilhação, suas consequências para a funcionalidade e durabilidade da estrutura e soluções de reparação das fendas, abordam-se ainda outras anomalias no betão armado do túnel e as respectivas soluções de reparação que se consideram relevantes para a obra.

Ao longo do capítulo, descrevem-se então os trabalhos desenvolvidos na empreitada, as respectivas metodologias e procedimentos, especificando os materiais e equipamentos utilizados em cada actividade.

5.2 Caracterização geral da obra

As estruturas que foram sujeitas a intervenção são constituídas por duas tipologias estruturais diferentes. Embora ambas sejam estruturas de betão armado, o método construtivo utilizado para a escavação e a colocação das paredes de contenção do túnel não foi o mesmo ao longo de todo o traçado, sendo este constituído por troços executados recorrendo ao método de NATM (*New Austrian Tunneling Method*) e também através de construção a céu aberto (*cut-and-over*)¹⁴. Foram intervencionados vários troços de 100 metros ao longo do túnel, com espessuras das paredes de betão variáveis entre 0.60 e 1.20 metros.

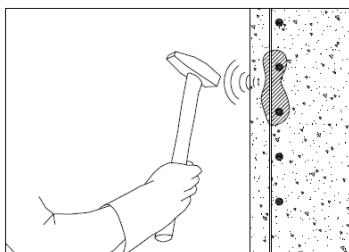
¹⁴ Em [40] é apresentada uma comparação dos diferentes métodos construtivos referidos para a construção de túneis em betão armado.

5.2.1 Patologia

Numa primeira abordagem foi feito o levantamento patológico, de modo a confirmar o estado de conservação dos troços do túnel. Com base nesse levantamento, foi produzido um mapeamento com a caracterização das anomalias encontradas e submetidas à aprovação do dono de obra.

A necessidade de se proceder a intervenções foi suscitada pelos resultados destes levantamentos efectuados a todas as estruturas de betão armado do túnel, com vista à caracterização do seu estado de conservação.

As deficiências mais significativas detectadas na inspecção realizada foram (i) a fendilhação generalizada em algumas partes da estrutura ao longo dos vários troços do túnel e (ii) superfícies da estrutura com betão danificado (descasque e perda do betão de recobrimento) com exposição de armaduras ou zonas ocas que apresentavam sinais de delaminação iminente (Figura 47).



*Figura 47 - Diagnóstico de zonas ocas no betão
(imagem fornecida pela HTEcnic)*

Quanto à **fendilhação**, diagnosticou-se a existência de algumas fendas devidas a movimentos e vibrações na estrutura e fendas mais generalizadas com origem na retracção do betão fresco, bem como em juntas de betonagem ou juntas entre painéis de betão pré-fabricado.

Dos dados obtidos a partir dos levantamentos efectuados, foram identificadas algumas consequências da fendilhação ao longo do túnel, das quais se destacam:

- Infiltrações de água com pressão em algumas zonas da estrutura através de fendas e juntas de dilatação;
- Deposição de sais na estrutura em zonas com alguma infiltração ou em zonas já secas;
- Existência de sinais de humidade em algumas fendas ao longo da estrutura.

Verificou-se ainda que algumas zonas apresentavam vestígios intensos de água em fendas com aberturas consideráveis (superiores a 1 mm), podendo, em caso de agravamento desta situação (infiltrações com elevada pressão da água proveniente do solo em volta da estrutura), atingir a estrutura em toda a sua espessura e, conseqüentemente, provocar o arrastamento de solos para o interior das galerias. Caracterizaram-se então todas as fendas quanto à sua extensão, abertura e profundidade e, com a aprovação da fiscalização e do dono de obra, a empreitada iniciou-se na identificação e marcação das fissuras a injectar, com recurso a tinta visível em ambiente nocturno.

5.2.2 Condicionantes

Tal como é comum nas obras de construção civil, existem diversos factores que condicionam o andamento da obra, a execução dos trabalhos e as próprias soluções de reparação. Esta empreitada não é excepção e existiram várias condicionantes à realização dos trabalhos de reparação do túnel.

O facto de a estrutura ser um túnel por si só já é uma forte condicionante pelo facto de apenas se conseguir aceder à parte interior da estrutura, tornando-se mais difícil avaliar as anomalias e a sua reparação. Em termos de qualidade da intervenção, parte do material de reparação das fendas poderia “perder-se” para o solo na envolvente da estrutura e não preencher os vazios pretendidos na estrutura. Assim sendo, houve necessidade de garantir um aumento de pressão gradual ao longo das injeções e uma furação estratégica dos elementos de betão a injectar, como se detalhará na secção seguinte - *5.3 Metodologia de intervenção e soluções de reparação*. A quantidade de resina a injectar em cada fenda teve de ser estimada pelo dobro do volume admitido para a fenda, considerando esta sempre da mesma dimensão (abertura) e com a profundidade do elemento de betão em que a fenda se verifica. De facto tendo-se acesso apenas ao interior da estrutura, torna-se praticamente impossível ser preciso na caracterização da profundidade das fendas, sendo portanto o volume de material a injectar um valor arbitrado dentro de parâmetros que se consideraram razoáveis. Tal facto dificultou bastante as medições das quantidades de trabalho e materiais, bem como a orçamentação da empreitada, estando sempre sujeita a ajustes.

Ao longo da empreitada existiram também condicionamentos quanto à execução dos trabalhos. Os meios afectos a cada zona de trabalho (equipamentos, materiais, etc.) tiveram que ser mobilizados diariamente no início dos trabalhos e desmobilizados no final dos mesmos. As infra-estruturas e equipamentos presentes no túnel que impediam a execução dos trabalhos foram também desviadas diariamente antes do início dos trabalhos e repostas no final. Quanto às infra-estruturas que não condicionavam a execução dos trabalhos, estas foram apenas protegidas, também diariamente, com recurso a protecções mecânicas.

O facto de ao longo do túnel as tipologias construtivas serem diferentes ao longo de alguns troços causou também algumas dificuldades, principalmente na identificação das fissuras prejudiciais para a entrada de água na estrutura. Esta dificuldade foi mais acentuada nos troços onde as paredes do túnel foram executadas por painéis em betão armado pré-fabricado colocados lado a lado, sendo que o grande desafio foi identificar as juntas entre painéis que estavam “abertas” e por onde ingressava água para o interior da estrutura, para estas serem tratadas como fendas com água.

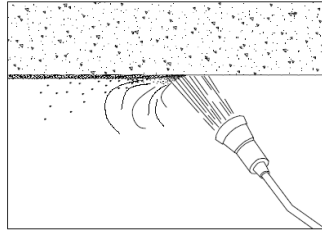
Esta empreitada teve ainda a particularidade de os trabalhos decorrerem em horário nocturno e em durações de apenas 4 ou 5 horas por dia (entre a 1h/2h e as 5h/6h). Este condicionamento em termos horários aliado às condicionantes de execução dos trabalhos causou naturalmente dificuldades no avanço temporal da intervenção.

5.3 Metodologia de intervenção e soluções de reparação

Para a execução dos trabalhos adoptaram-se metodologias que permitissem garantir a gestão e coordenação da obra, garantindo a fiabilidade da execução, as condições de segurança e o cumprimento do prazo contratual com o dono de obra. O planeamento geral foi então definido tendo em conta o resultado da análise das características da empreitada (caracterização geral da obra, patologias e condicionantes) e definiram-se as metodologias de base que garantiam a execução eficaz, atempada e em segurança da intervenção.

Os trabalhos iniciaram-se então pela limpeza de toda a área de intervenção com recurso a jacto de água¹⁵ sob pressão mínima de 200 bar (Figura 48). Para tal, todas as infraestruturas existentes foram resguardadas de qualquer contacto com a água decorrente da limpeza do túnel, com a colocação de estruturas de protecção que permitisse a realização das operações de limpeza sem quaisquer riscos de danificar os equipamentos existentes. Os trabalhos preparatórios incluíram ainda a execução de protecções adequadas das zonas de trabalho e a colocação de equipamentos de iluminação adicionais, sempre que a iluminação do túnel se considerava insuficiente para a realização dos trabalhos.

¹⁵ A limpeza com jacto de água é indicada para diversas situações, sendo correntemente usada para a preparação de superfícies de betão, por ser um método expedito e de baixo custo. Os equipamentos com recurso a jacto de água para limpeza da superfície do betão usam pressões na ordem dos 40 a 60 MPa, podendo a água utilizada ser aquecida ou conter aditivos para melhor remoção da sujidade das superfícies [41].



*Figura 48 - Limpeza da superfície do betão com jacto de água
(imagem fornecida pela HTecnic)*

Sendo que as soluções de reparação das diversas anomalias serão detalhadas nas secções seguintes (5.3.1 *Soluções de reparação de fendas por injeção* e 5.3.2 *Outros trabalhos de reparação*), listam-se desde já os trabalhos realizados nesta empreitada:

- Montagem e desmontagem dos estaleiros e acessos;
- Desvio das infraestruturas necessárias à realização dos trabalhos;
- Proteção provisória das redes de infraestruturas existentes, cuja permanência no local fosse compatível com a realização dos trabalhos;
- Lavagem do túnel;
- Execução de levantamento e respetivos relatórios, para verificação e confirmação das patologias identificadas pelo Dono de Obra;
- Limpeza das superfícies de betão e fresagem das fendas com deposição de sais;
- Execução de injeções de resina epoxídica para o tratamento e colmatação de fendas secas;
- Execução de injeções de resina de espuma poliuretano para o tratamento e colmatação de fendas com água;
- Execução de injeções de gel acrílico para o tratamento e colmatação de fendas húmidas que tenham sido sujeitas a passagem de água e juntas de dilatação;
- Tratamento das superfícies de betão com argamassa de reparação;
- Colocação de banda elástica para condução de águas onde o fluxo de água tenha sido muito elevado e onde a injeção não tenha sido eficaz, para as caleiras na base dos hasteais.

5.3.1 Soluções de reparação de fendas por injeção

A intervenção iniciou-se na análise da base de aplicação da injeção, caracterizando o betão (características físicas e mecânicas) e a água de infiltração (características químicas) no caso de fendas húmidas, antes da escolha dos componentes da mistura a injectar.

Para cada tipo de fenda a tratar em função do seu grau de humidade e características da base, definiu-se então o seguinte procedimento: (i) a reparação de fendas e juntas de betonagem secas seria com injeções de resina epoxídica; (ii) as fendas e juntas de betonagem com infiltração ou elevado grau de humidade seriam preenchidas com resina de espuma de poliuretano rígido hidro-reactivo, para colmatação das infiltrações e impedimento do ingresso de água no interior das galerias; e (iii) as fendas húmidas ou aparentemente secas, sujeitas a movimentos da estrutura e passagens anteriores de água com deposição de sais, e com risco de ocorrência de novas entradas de água, por vezes previamente injectadas com espuma de poliuretano, bem como juntas de dilatação, seriam injectadas com resina de gel acrílico muito flexível.

Para se proceder à injeção elaborou-se o esquema de furos. Definiu-se a colocação dos injectores ao longo de toda a extensão das fissuras (Figura 49), dispostos com um intervalo de 0.20 m entre si, alternadamente de cada lado da fenda e com um ângulo de 45° em relação à superfície do betão de modo a intersectar a fenda aproximadamente a meio da sua profundidade, e com uma distância de cada injector à fenda igual a metade da espessura do elemento de betão a injectar. No caso de fendas com bifurcação, foi sempre colocado um injector em cada ponto da bifurcação.

A limpeza do interior do furo, após a furação com broca, foi sempre feita de dentro para fora com a ajuda de um tubo ou mangueira de ar até ao fundo do furo para retirar todas as partículas soltas provenientes da furação. A limpeza superficial dos furos e dos bordos das fissuras foi feita também com ar comprimido, numa faixa de 0,10 m para cada lado da fenda, assegurando a inexistência de pó, detritos, materiais de eflorescências, tintas, etc., de forma a garantir uma boa adesão entre a resina e o betão.



*Figura 49 - Colocação dos injectores após furação
(fotografia fornecida pela HTecnic)*

Os equipamentos de injeção foram bombas a ar comprimido (monocomponentes ou bicomponentes dependendo do material a injectar), controladas por impulsos, com manómetros simples e registadores.

A injeção teve sempre início nos injectores localizados a uma cota inferior (injecção de baixo para cima), tendo o cuidado de prolongar a injeção até ao aparecimento de material no furo localizado imediatamente acima. Esta operação decorreu sem interrupções e lentamente, ao longo de cada fenda, de forma a assegurar o correcto preenchimento dos vazios. Nos casos em que verificou uma duração excessiva no aparecimento de material no injector adjacente, procedeu-se ao aumento gradual da pressão de injeção, incrementando de 25 em 25 bar, na ponta da pistola, aguardando sempre o aparecimento ou não de material no injector adjacente antes de se aumentar novamente a pressão.

As resinas escolhidas para injeção de todos os tipos de fendas são produtos isentos de solventes, sem retracção e de volume constante em ambientes secos.

5.3.1.1 Injecção de resina epoxídica

Em fendas e juntas de betonagem secas foi efectuada a injeção de um produto à base de **resina epoxídica**¹⁶ de dois componentes, de rápido endurecimento, reduzida viscosidade e elevada aderência ao betão. As características mecânicas deste produto são superiores às do betão, nomeadamente em termos de resistências à compressão e tracção e módulo de elasticidade.

Foi feita a selagem superficial das fendas secas ao longo de toda a extensão, com uma argamassa epoxídica (Figura 50), de elevada resistência e elevada adesão ao betão, que, ao curar, forma um selo forte de maneira a suportar as pressões de injeção impedindo a saída do material injectado pela superfície das fendas.

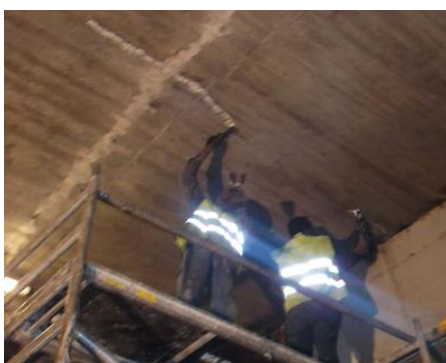


Figura 50 - Selagem superficial de fissura seca com argamassa epoxídica (fotografia fornecida pela HTecnic)

¹⁶ Ver ficha técnica do produto de injeção SIKA – *Sikadur-52 Injection* [42]

Em seguida, foi feita a mistura dos dois componentes (parte A e parte B) do produto da resina epoxídica num recipiente e esta foi injectada por uma bomba monocomponente, respeitando o *pot life* referido na ficha técnica e embalagem do produto. Após a cura do material injectado, foram removidos os injectores e os furos de injeção foram preenchidos com a argamassa epoxídica de selagem ou com o produto injectado.

5.3.1.2 Injeção de resina de espuma de poliuretano

Em fendas húmidas e com infiltração injectou-se um produto de **resina de espuma poliuretano**¹⁷ de dois componentes, hidrorreactivo (expansão de 25-30 vezes o volume injectado), de baixa viscosidade, elevada aderência ao betão e rápido endurecimento (ajustável em função da quantidade de acelerador), de maneira a estancar as infiltrações. As características mecânicas deste produto são também superiores à do material de suporte, nomeadamente em termos de resistência à flexão-tracção e módulo de elasticidade.

A resina de poliuretano de dois componentes (parte A e parte B) foi injectada sem selagem das fendas, por meio de bomba de ar comprimido, por impulsos, dupla, com pressão máxima até cerca de 250 bar, respeitando o *pot life* referido na ficha técnica e embalagem do produto, tal como referido anteriormente.

O afastamento transversal dos furos de injeção da resina de poliuretano foi ajustado de forma a permitir a intersecção da fenda sensivelmente a metade da espessura da peça a injectar.

Nestes trabalhos houve a necessidade de grande controlo da pressão de injeção, pois inicialmente, ao injectar-se com uma pressão demasiado alta, deu-se o aparecimento de espuma à cota de superfície (passeios e jardins públicos), significando que a resina se infiltrara pelos vazios do solo envolvente da estrutura, não estando a injeção a ser eficaz. Para corrigir este facto, começou a injectar-se a resina a pressões muito baixas (cerca de 6 a 9 bar), aumentando-se gradualmente a injeção quando o aparecimento de material no injector seguinte era extremamente demorado. Tal procedimento permitiu controlar a injeção de produto garantindo o preenchimento dos vazios das fendas na estrutura de betão.

¹⁷ Ver ficha técnica do produto de injeção BASF – *MasterRoc MP 355 1K* [43]



*Figura 51 - Injecção de resina de poliuretano
(fotografia fornecida pela HTecnic)*

5.3.1.3 Injecção de resina de gel acrílico

Em fendas de maiores dimensões ou sujeitas a movimentos, húmidas ou aparentemente secas, que tenham sido sujeitas a passagens anteriores de água com deposição de sais, e com risco de ocorrência de novas entradas de água, e em juntas de dilatação foi injectado um produto de **gel acrílico**¹⁸ tixotrópico, de grande flexibilidade, elevada aderência e de muito rápida reacção.

Esta resina bicomponente (mistura de quatro componentes) foi injectada, sem selagem das fendas ou juntas de dilatação, por meio de bomba de ar comprimido, por impulsos, dupla, com pressão máxima até cerca de 250 bar.

As duas partes do produto (cada parte com dois componentes) foram misturadas apenas na cabeça de mistura da bomba de injeção, não sendo misturadas num recipiente devido ao muito rápido tempo de reacção (neste caso, cerca de 10 segundos mas em função das quantidades misturadas).

5.3.1.4 Controlo de qualidade das injeções

De forma a garantir o preenchimento das fendas, a fiscalização solicitou a execução carotes em certas zonas intersectando toda a espessura do elemento de betão injectado. Foram realizadas carotes com diâmetro mínimo de 43 mm, por cada 10 m de fissura injectada em locais definidos pela fiscalização.

¹⁸ Ver ficha técnica do produto de injeção BASF – *MasterRoc MP 303* [43]

Após a execução das carotes e garantia da qualidade das injeções, procedeu-se à selagem dos negativos com argamassa cimentícia de retracção controlada de resistência igual ou superior à do betão existente.

Em fendas em que após a injeção as carotes de ensaio evidenciaram a presença de fendas mal preenchidas, reinjectaram-se as fendas, redefinindo-se o afastamento entre injectores, colocando injectores entre os existentes, reduzindo o seu afastamento para metade.

Foram também analisadas com detalhe as fichas técnicas dos produtos a utilizar, bem como das fichas de dados de segurança dos mesmos no início da empreitada e ao longo da execução dos trabalhos, de maneira a garantir a correcta execução das misturas em função das características pretendidas para os produtos e avaliar as propriedades dos mesmos (como a cor, a viscosidade e a expansão), garantindo a sua qualidade durante os trabalhos de injeção.

5.3.2 Outros trabalhos de reparação

Para além da injeção das fendas, foram tratadas as superfícies em betão da estrutura que, como consequência da exposição prolongada e contacto com a água, devido à anterior fendilhação, se encontravam danificadas, com sinais visíveis de oxidação e exposição das armaduras e sem qualquer camada de protecção em betão (perda do betão de recobrimento).

Estas zonas foram reparadas com recurso a aplicação de argamassa de reparação com retracção controlada, sendo que as superfícies da estrutura foram previamente preparadas e limpas para aplicação da mesma. As armaduras foram também tratadas contra os efeitos da corrosão, antes da aplicação das argamassas de tratamento, através da aplicação de uma pintura antioxidante.

Foi necessário ainda, em algumas zonas do túnel, colocar e fixar à abóbada e aos hasteais bandas elásticas para condução das águas para a caleira do túnel na zona inferior dos hasteais, em zonas com fendilhação elevada ou juntas de dilatação com infiltração com elevada pressão de água, onde anteriormente a injeção não fora eficaz.

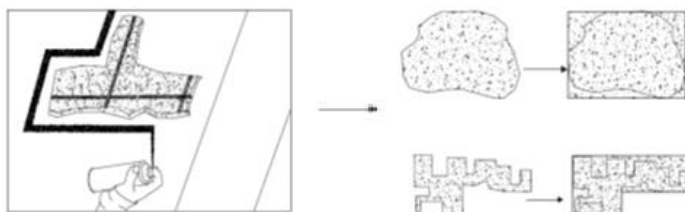
5.3.2.1 *Reparação superficial de betão*

Para a reparação das áreas de betão degradado, o faseamento de execução, após inspecção completa da estrutura e mapeamento das zonas identificadas como críticas, foi o seguinte:

- Marcação de zonas a reparar;
- Delimitação das zonas sujeitas a regularização por corte com disco;
- Remoção do betão degradado nas zonas a reparar;
- Preparação da superfície de betão e protecção das armaduras;
- Reparação das zonas afectadas com argamassa de reparação.

Os trabalhos de reparação do betão iniciaram-se então pela limpeza das superfícies de betão. Tal foi efectuado com jacto de água de forma a eliminar sujidade, gorduras, partículas soltas ou desagregadas, bem como quaisquer elementos estranhos ao betão, incluindo-se óleos, pinturas, pó ou detritos.

De seguida, procedeu-se à preparação das superfícies a reparar. Iniciou-se então a marcação e delimitação das áreas sujeitas a remoção do betão e corte do contorno com disco diamantado, com uma profundidade mínima de 5 mm, evitando irregularidades e escamas de betão e de modo a garantir formas geométricas mais regulares, como esquematiza a Figura 52.



*Figura 52 - Trabalhos de marcação para corte das superfícies a tratar
(imagem fornecida pela HTecnic)*

A camada superficial do betão, na periferia da área a tratar, foi removida através de picagem com martelo pneumático ligeiro, evitando golpes que danificassem as arestas e contornos da zona preparada por corte, procurando-se conferir uma rugosidade ao betão existente que, não sendo excessiva, melhorasse a aderência do material de reparação.

A remoção do betão degradado por picagem com martelo pneumático ligeiro foi feita de dentro para fora da face a tratar até se encontrar betão sã. Nas zonas em que se observou exposição de armaduras ou varões que indiciavam corrosão, o corte e picagem do betão expôs a totalidade das armaduras, deixando 2 cm de distância para o interior do betão (Figuras 53).

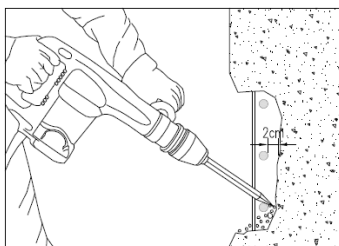


Figura 53 - Picagem do betão com martelo pneumático ligeiro (imagem fornecida pela HTecnic)

No final dos trabalhos de corte e picagem do betão degradado, foram removidas todas as poeiras e detritos resultantes da preparação e picagem das superfícies e feita novamente a limpeza destas através de água (Figura 54).



Figura 54 - Área de reparação após tratamento e limpeza da superfície (fotografia fornecida pela HTecnic)

Em zonas onde se verificou exposição das armaduras e quando no decurso dos trabalhos de preparação de superfícies de betão se verificaram colorações no betão que indicassem um estado avançado de corrosão ou armaduras expostas devido a esses mesmos trabalhos, procedeu-se ao tratamento das armaduras.

A limpeza das armaduras foi feita por abrasão com escova de arame, para remoção dos produtos resultantes da corrosão do aço (ferrugem), poeiras ou outros materiais que pudessem reduzir a aderência das armaduras ao material de reparação ou contribuir para a sua corrosão (Figura 55).

De seguida, foi feita a limpeza, novamente com jacto de água, para remover partículas soltas e poeiras decorrentes dos procedimentos anteriores, e as armaduras foram protegidas com um inibidor de corrosão, aplicado por pincelagem (Figura 56), também com propriedades aderentes (agente de colagem) entre o betão “velho” e a argamassa de reparação.



*Figura 55 - Zona a reparar com armaduras tratadas
(fotografia fornecida pela HTecnic)*



*Figura 56 - Armaduras protegidas com inibidor de corrosão
(fotografia fornecida pela HTecnic)*

Caso a secção do varão ou varões se encontrasse reduzida de forma significativa (perda de mais de 30% de diâmetro) devido à elevada corrosão, após escovagem para remoção da ferrugem, procedeu-se à substituição das zonas críticas por varões novos ligados aos existentes por soldadura.

Concluídos os trabalhos preparatórios, deu-se início à preparação da argamassa tixotrópica de elevada compatibilidade com o betão, para reparações estruturais¹⁹. Na confecção da argamassa, a abertura da embalagem foi feita imediatamente antes da sua colocação no tambor da misturadora, utilizando, tanto quanto possível, todo o conteúdo da embalagem. A quantidade de água a adicionar ao pó foi a definida pelo fabricante tendo em conta a consistência pretendida (ver ficha técnica do produto).

Imediatamente antes da aplicação da argamassa, preparou-se a superfície saturando-a com água. A aplicação de argamassa foi feita com talocha em sucessivas camadas de material (tendo-se em atenção as espessuras máximas consideradas pelo fabricante para cada camada de aplicação), até preencher a espessura pretendida, nivelando o material de reparação com o betão, tendo cada camada sido aplicada após o endurecimento da anterior, previamente saturada com água.

Nos instantes precedentes à aplicação, removeu-se o eventual excesso de água proveniente da saturação, com ar comprimido ou com esponja, de modo a não ficar qualquer água livre sobre as superfícies.

¹⁹ Ver ficha técnica do produto BASF – *MasterEmaco S 488* [43]



Figura 57 - Reparação do betão com argamassa tixotrópica (fotografia fornecida pela HTecnic)

5.3.2.2 Colocação de banda elástica em fissuras

Em fissuras, juntas de betonagem ou de dilatação onde se verificou penetração de água com elevado fluxo, e não sendo viável outro tipo de técnica de estanqueidade, após diversas tentativas de injeção, foram utilizadas bandas de elevada elasticidade²⁰, com 3 mm de espessura, para conduzir a água infiltrada para a rede de drenagem da via (caleira), como mostra a Figura 58.

Tal como os trabalhos de reparação anteriormente descritos, a aplicação das bandas elásticas iniciou-se pela limpeza do suporte, garantindo que na envolvente das fissuras ou juntas as superfícies estariam isentas de pó e gorduras e/ou matérias estranhas que impedissem a aderência das bandas.

Foi aplicada fita adesiva ao longo de toda a fissura ou junta a reparar, de ambos os lados, após regularização das superfícies, criando uma faixa com a fissura/junta no meio. De seguida, aplicou-se adesivo epoxídico na largura da faixa definida pelo adesivo ao longo de toda a extensão da junta a tratar, com espessura de 2 mm, para colocação da banda elástica por colagem. A banda foi aplicada com o máximo cuidado e rigor, mantendo-se tensa e cobrindo uniformemente toda a fissura/junta, garantindo-se a colagem ao adesivo, removendo eventuais bolhas de ar com o auxílio de espátula ou rolo. Para finalizar a colocação das bandas garantindo a máxima estanqueidade, aplicou-se fita adesiva sobre a lâmina colada ao adesivo epoxídico e aplicou-se por cima uma segunda camada do mesmo adesivo epoxídico.

²⁰ Ver ficha técnica do produto BASF – *MasterSeal 930* [43]

As ligações ou emendas entre bandas foram realizadas por termosoldadura²¹ a ar quente, de acordo com as recomendações do fabricante, garantindo uma sobreposição mínima de 15 cm.



Figura 58 - Banda elástica aplicada sobre junta de dilatação

5.4 Considerações finais

Ao acompanhar esta obra, concluiu-se que, na reparação de fendas por injeção numa estrutura de betão, para se obter os resultados desejados, para além de produtos e sistemas de injeção adequados e compatíveis com as condições da estrutura e das fendas, de um planeamento correcto dos métodos de injeção em complemento com equipamentos de injeção adequados, é crucial uma equipa técnica especializada e familiarizada com os produtos e equipamentos de injeção, bem como a garantia de uma perfeita preparação e limpeza do substrato.

Nesta empreitada, a escolha dos materiais a injectar foi a mais adequada em função das características da estrutura e condições das fendas: (i) injeção de resina epoxídica em fendas secas e juntas de betonagem rígidas; (ii) injeção de resina de espuma de poliuretano em fendas húmidas e com fluxo de água, de maneira a estancar as infiltrações; e (iii) injeção de resina acrílica em fendas de maiores dimensões e juntas de dilatação com presença de água e sujeitas a movimentos da estrutura. Considera-se apenas importante referir que em complemento à injeção de resina de espuma de poliuretano, poderia ter sido injectada, recorrendo aos mesmos furos e bicos de injeção, uma resina de gel de poliuretano, de maneira a conferir uma reparação de carácter mais permanente às fendas com anterior entrada de água.

²¹ A termosoldadura é um processo de selagem a quente onde dois materiais (polímeros termoplásticos compatíveis) são fundidos por calor e pressão de modo a garantir uma junta entre ambos para garantia de integridade e estanqueidade.

Também a escolha e utilização dos equipamentos de injeção (bombas) foi adequada a cada produto de injeção, em função dos diferentes tempos de reacção dos produtos após mistura dos componentes. Quanto ao método de injeção utilizado, através de injectores mecânicos inseridos em furos feitos com broca, considera-se que este foi o mais eficaz para a garantia do preenchimento de todos os vazios das fendas (como foi descrito pormenorizadamente no *Capítulo 4 – Tecnologias da Reparação de Fendas por Injecção*).

O facto de, no início da empreitada e ao logo da execução dos trabalhos, terem sido analisadas com detalhe as fichas técnicas dos produtos a utilizar, bem como das fichas de dados de segurança dos mesmos, revelou-se muito importante para a correcta execução das misturas em função das características pretendidas para os produtos e para a avaliação das propriedades dos mesmos (avaliação da mistura através da cor, viscosidade, expansão, etc.), garantindo o controlo de qualidade durante os trabalhos de injeção.

Os resultados obtidos com as soluções de reparação adoptadas foram muito positivos e os objectivos da reparação foram cumpridos com sucesso. Na grande maioria dos casos, garantiu-se a estanqueidade das estruturas de betão, evitando-se infiltrações para o interior das galerias do túnel e, nas reparações rígidas (com resina epoxídica), garantiu-se o monolitismo e reposição da capacidade resistente das estruturas.

Em fendas onde não foi possível estancar a infiltração de água através de injeção, a opção pela utilização de bandas elásticas garantiu uma solução eficaz e do agrado do dono de obra. Apesar de não eliminar as anomalias (fendas) e não evitar infiltrações para o interior da estrutura, esta solução evita a presença de água em zonas indesejadas, encaminhando a água que penetra na estrutura para a rede de drenagem da via.

Assim sendo, com as soluções de reparação utilizadas na intervenção, ficou garantida a funcionalidade das galerias do túnel, bem como a sua segurança estrutural, contribuindo a intervenção para o aumento dos padrões de durabilidade das estruturas do túnel e atendendo às exigências do dono de obra.

6 Conclusões

6.1 Considerações finais

A presença de anomalias nas estruturas de betão é um problema que pode acarretar grandes prejuízos, podendo mesmo comprometer a sua segurança. A avaliação correcta das anomalias e a intervenção eficaz é crucial para evitar consequências indesejadas. A durabilidade das estruturas de betão está assim directamente associada à sua rigorosa e periódica inspecção e manutenção. É importante ter em conta ainda que os custos de manutenção periódica das estruturas são consideravelmente inferiores quando comparados com os associados a uma intervenção de emergência, caso a estrutura perca a sua funcionalidade ou, em caso extremo, se estiver em risco de colapso.

A fendilhação é a anomalia com maior expressão nas estruturas de betão e, como foi detalhado ao longo do trabalho, é um processo muito variável e influenciado por diversos factores. Na presença de fendilhação, a rigidez e resistência de uma estrutura pode diminuir se esta assumir valores demasiado elevados de extensão, abertura e profundidade. Por outro lado, a fendilhação pode afectar a estética e funcionalidade das estruturas e prejudicá-las a sua durabilidade, por facilitar a entrada de agentes agressivos. Assim sendo, considera-se bastante importante que exista monitorização das fendas nas estruturas e, caso se considere que estas são prejudiciais para o funcionamento das construções, se proceda à sua reparação.

Desde que foi publicada a norma europeia EN1504, todas as questões relacionadas com a reparação e protecção de betão, nomeadamente a reparação de fendas e vazios, tem evoluído de forma bastante significativa, garantindo trabalhos de qualidade com produtos adequados para cada tipo de intervenção. Salienta-se então a elevada importância da existência de um documento que centralize a informação chave para os utilizadores, de modo a promover a correcta reparação e manutenção das estruturas de betão, existindo agora uma norma única e integrada que abrange todas as questões essenciais quanto à reparação de betão.

As fendas em estruturas de betão podem ser reparadas com a aplicação de resinas ou produtos cimentícios, através de sistemas de injeção. A tecnologia de injeção surgiu como sistema diferenciado para a reparação de fendas, sendo uma solução definitiva, com qualidade e económica, dando garantias de reparação às estruturas de betão com problemas de fendilhação.

É essencial escolher a combinação certa entre o produto de injeção (material ou combinação de materiais), equipamentos de injeção e método de aplicação (técnica e procedimentos). Estes são os três principais factores para o sucesso das reparações de fendas em betão com sistemas de injeção, e que estão directamente envolvidos na eficácia dos trabalhos realizados e na durabilidade das estruturas sujeitas a intervenção.

A escolha do produto a injectar recai essencialmente na escolha do material mais adequado para atender aos requisitos definidos para a execução da reparação em função das suas propriedades, após avaliação do estado da estrutura e das condições e características das fendas a reparar. A viscosidade, a flexibilidade e o comportamento em contacto com a água são as características chave para a eficácia do produto de injeção.

A selecção do equipamento de injeção mais adequado ao produto a injectar e ao estado da estrutura, aliada à correcta preparação, mistura e aplicação do produto, é também um factor-chave para o sucesso da reparação. Neste domínio, são relevantes a dosagem e a mistura iniciais do produto até à sua aplicação, através de bombas adequadas aos produtos e às pressões definidas para a reparação, usando-se os bicos de injeção mais apropriados para cada caso.

A escolha do método de injeção mais correcto é o último factor determinante para o sucesso dos trabalhos de reparação de fendas, devendo ser implementadas as técnicas de aplicação mais adequadas a cada caso e os respectivos procedimentos de execução, de modo a garantir soluções eficazes e com qualidade.

A injeção à base resinas é a tecnologia mais comum para a reparação de fendas, pois além do processo de injeção ser simples e expedito, as características dos materiais resinosos conferem soluções com garantias de qualidade na intervenção.

De entre os produtos de injeção à base de resinas, os mais utilizados ao longo dos últimos anos são os epoxídicos. Se for necessária a reparação de fendas para restaurar a integridade estrutural, o uso de resinas epoxídicas é geralmente o mais adequado. No entanto, a sua utilização, por si só, não é capaz de reparar eficazmente todos os problemas de fendilhação, em função das características e condições das fendas, nomeadamente em suportes húmidos ou com grande amplitude de movimento. Neste domínio, foi muito importante a evolução dos produtos à base de resinas, com o surgimento de produtos para injeção de fissuras à base de resinas de poliuretano e resinas acrílicas.

Caso não haja presença de água ou humidade no suporte, a injeção de produtos à base de **resina epoxídica** é a solução mais indicada para a reparação estrutural, sendo a solução mais fiável e a que garante maior tensão de aderência ao betão e rigidez à estrutura. Se houver necessidade de reparação estrutural com presença de água na fenda, poderão ser utilizados produtos cimentícios para injeção (**grouts de microcimento**), que promovem um enchimento rígido e com características semelhantes às do betão existente.

Para enchimentos flexíveis de fendas, com ou sem a presença de água, reparação de juntas de dilatação com infiltrações e outros defeitos com a presença de água, deverá ser utilizado o sistema composto pela pré-injeção com resina de **espuma de poliuretano**, como solução provisória no caso de existência de fluxo de água, completada em seguida por injeção de resina de **gel de poliuretano** ou resina de **gel acrílico**.

Tabela 19 - Materiais a injectar em função das características das fendas

Características da fenda Materiais	PRESENÇA DE ÁGUA		ACTIVIDADE		ABERTURA
	Humidade/Água sem pressão	Água com pressão	Sistemas Rígidos	Sistemas Flexíveis	Mínima
Grouts Cimentícios	X		X		> 0.5 mm
Resinas Epoxídicas			X		> 0.1 mm
Resinas de Espuma de PU	X	X		X	≥ 0.2 mm
Resinas de Gel de PU	X			X	≥ 0.2 mm
Resina de Gel Acrílicas	X			X	< 0.05 mm

6.2 Perspectivas de desenvolvimentos futuros

Os avanços na tecnologia de injeção de fissuras têm sido significativos, em particular quanto aos produtos de injeção e suas propriedades. Como foi detalhado ao longo do trabalho, existem já resinas de espuma de poliuretano rígidas que permitem a injeção de fissuras para reparação estrutural e reposição do monolitismo das estruturas na presença de água. Esta evolução tem vindo a revelar-se importante, visto os produtos à base de resinas epoxídicas não serem aplicáveis em situações de fendas com água ou humidade acentuada. Além disso, têm vindo também a ser testados produtos de base epoxídica insensíveis à humidade que, ao contrário dos produtos mais comuns, não têm problemas de aderência em fissuras húmidas. Em relação aos equipamentos para injeção de resinas, têm vindo também a ser estudadas opções de melhoramento dos sistemas, como bombas com controlo automatizado do volume e pressão de injeção através de um *microchip* em cada obturador, que permitem trabalhos ainda mais expeditos e eficazes.

Uma das grandes lacunas quanto aos produtos de injeção é o facto de os fornecedores não serem claros quanto à abertura das fendas a injectar, estando a informação muitas vezes indisponível nas fichas técnicas, o que torna a informação pouco completa em relação a alguns produtos. Tal aplica-se também aos tempos de cura e de endurecimento dos materiais de injeção, que não estão também disponíveis nas fichas de produtos, na maior parte dos casos. Considera-se que estas características são relevantes na escolha dos produtos para os sistemas de injeção, e estando a informação oculta ou talvez não conhecida, induz o utilizador em dúvida. Seria interessante definir um “template” para as fichas técnicas dos produtos de modo a serem documentos de certa forma normalizados, tal como o exemplo das tabelas de requisitos de desempenho da norma EN1504, que garantisse que as marcas/fabricantes dos produtos de injeção revelassem toda a informação útil acerca dos mesmos.

Seria ainda importante avaliar a durabilidade a longo prazo das injeções com resinas de poliuretano e resinas acrílicas (materiais menos correntes e com menos informação disponível que as resinas de base epoxídica) quando sujeitos aos agentes climáticos, a como água, o calor, os ciclos térmicos e as radiações UV, pois a vida útil dos sistemas de injeção à base destes produtos pode ser significativamente influenciada por todos estes factores.

Referências bibliográficas

- [1] SHASH, A.A – *Repair of Concrete Beams - A Case Study*. Construction and Building Materials, vol. 19, pp. 75-79, 2005.
- [2] ISSA, Camille A.; DEBS, Pauls – *Experimental Study of Epoxy Repairing of Cracks in Concrete*. Construction and Building Materials, vol. 21, pp. 157-163, 2007.
- [3] EKENEL, Mahmut; MYERS John J. – *Durability Performance of RC Beams Strengthened with Epoxy Injection and CFRP Fabrics*. Construction and Building Materials, vol. 21, pp. 1182-1190, 2007.
- [4] FERREIRA, Joana Alexandra de Almeida Ferreira – *Técnicas de Diagnóstico de Patologias em Edifícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Construções, FEUP, 2010.
- [5] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-9 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 9: Princípios gerais para a utilização dos produtos e sistemas* - Versão portuguesa da EN 1504-9:2008. Instituto Português da Qualidade, Setembro de 2009
- [6] CORREIA, João Ramôa; PAULO, Pedro Vaz; BRITO, Jorge de; BRANCO, Fernando – *Anomalias em Betão Armado e Pré-Esforçado*. Slides de Apoio à Disciplina de Patologia e Reabilitação da Construção, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, IST, 2014.
- [7] SMOAK, W. Glenn – *Guide to Concrete Repair*. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Books for Business, 2002.
- [8] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – *FHWA Develops Resources to Prevent and Mitigate ASR in Concrete*. U.S. Department of Transportation, Publication Number: FHWA-HRT-09-008, November 2008.
- [9] COSTA, António – *Reparação de Estruturas de Betão Armado*. Slides de Apoio à Disciplina de Reabilitação e Reforço de Estruturas, Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas, IST.
- [10] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-3 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 3: Reparação estrutural e não-estrutural* - Versão portuguesa da EN 1504-3:2005. Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 2006.

- [11] BRITO, Jorge de; FLORES, Inês – *Diagnóstico, Patologia e Reabilitação de Construções em Betão Armado*. Folhas de apoio da Disciplina de Patologia e Reabilitação da Construção, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, IST, 2005.
- [12] CÁNOVÀS, Manuel Fernandez – *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*. 2ª Edição, Editorial Dossat, Madrid, 1984.
- [13] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-5 – Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 5: Injecção do betão - Versão portuguesa da EN 1504-5:2004*. Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 2006.
- [14] Committee B/517/8: Concrete - *EN 1770:1998 – Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of the coefficient of thermal expansion*. BSI, November 1998.
- [15] SIKA – *Injecção de Juntas de Betonagem, Fissuras e Vazios*. Slides de apresentação de produtos e equipamentos SIKA (fornecidos por representante da marca, Setembro de 2015).
- [16] CEB - Comité Euro-International du Béton – *Guide to Durable Concrete Structures*. Bulletin d'Information nº166, Lausanne, 1985.
- [17] THE CONCRETE SOCIETY – *Technical Report No. 69 - Repair of Concrete Structures with Reference to BS EN1504*. Abril 2009.
- [18] OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda. – *Métodos de Inspeção e Ensaio*. Disponível online em www.oz-diagnostico.pt (Outubro de 2015).
- [19] PIANCASTELLI, Élvio Mosci - Redação AECweb / e-Consturmarket – *Patologias do concreto*. Disponível online em www.aecweb.com.br/cont/m/rev/patologias-do-concreto (Outubro de 2015).
- [20] APPLETON, João – *Estudos de Diagnóstico em Edifícios. Da Experiência à Ciência*. 2º Seminário: A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação. Porto, FEUP, Outubro de 2002.
- [21] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-1 – Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e*

avaliação de conformidade. Parte 1: Definições - Versão portuguesa da EN 1504-1:2005. Instituto Português da Qualidade, Novembro de 2006.

[22] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-2 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 2: Sistemas de protecção superficial do betão* - Versão portuguesa da EN 1504-2:2004. Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 2006.

[23] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-4 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 4: Colagem estrutural* - Versão portuguesa da EN 1504-4:2004. Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 2006.

[24] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-6 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 6: Ancoragem de armaduras de aço* - Versão portuguesa da EN 1504-6:2006. Instituto Português da Qualidade, Maio de 2008.

[25] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-7 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 7: Protecção contra corrosão de armaduras* - Versão portuguesa da EN 1504-7:2006. Instituto Português da Qualidade, Maio de 2008.

[26] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-8 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 8: Controlo de qualidade e avaliação de conformidade* - Versão portuguesa da EN 1504-8:2004. Instituto Português da Qualidade, Dezembro de 2006.

[27] CEN - Comité Europeu de Normalização, *NP EN 1504-10 – Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade. Parte 10: Aplicação de produtos e sistemas e controlo da qualidade da obra* - Versão portuguesa da EN 1504-10:2003. Instituto Português da Qualidade, Maio de 2008.

[28] BASF – *Norma Europeia EN 1504 - Guia ilustrado, simplificado para todos os intervenientes na reparação de betão*. Disponível online em www.basf.pt (Novembro de 2015).

[29] CORREIA, João Ramôa – *Protecção, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado*. Slides - Introdução à Reabilitação de Edifícios Contemporâneos. FUNDEC, IST, Junho de 2011.

[30] GIOVANETTI, José Nicolau Gobbo; SANTORO, Carlos Eduardo Maturano; ALMEIDA JUNIOR, Waldomir; DE PAULO, Carla Castro – *Tratamento de Infiltrações e Selamento Estrutural de Fisrruas com Sistemas de Injecção em Estruturas de Concreto de Barragens e Usinas Hidrelétricas*. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. Foz do Iguaçu, 11 a 13 de Maio de 2015.

[31] SIKA – *Impermeabilização - Soluções para Vedação de Infiltrações, usando os Sistemas de Injecção Sika em Estruturas de Concreto, Alvenaria e Pedra Natural*. Catálogo Sika Brasil Marketing. Disponível online em <http://bra.sika.com> (Setembro de 2015).

[32] HILLEMEIER, Bernd – *Instandsetzung und Erhaltung von Betonbauwerken* (Recuperação e Manutenção de Construções de Betão, em Alemão). Ernst & Sohn, Berlim, 1999.

[33] MURRA, Myles A. – *Epoxy Injection Welds Cracks Back Together - But materials and methods must be right for the job*. Concrete Construction, January 1987. Available online at www.concreteconstruction.net/concrete-articles/ (Agosto de 2015).

[34] SCHMID, Jay – *Epoxy or Polyurethan Foam*. Waterproof! Magazine, Spring 2010. Available online at www.waterproofmag.com (Agosto de 2015)

[35] ALMEIDA JUNIOR, Waldomiro – *Utilização de Sistemas de Injeção para Recomposição Estrutural e Tratamento de Infiltrações das Estruturas de Concreto de Usinas Hidrelétricas*. MC-Bauchemie, Brasil. Comitê Brasileiro de Barragens, XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Salvador, 12 a 15 de Outubro de 2003.

[36] MINORU TAKAGI, Emilio; ALMEIDA JUNIOR, Waldomiro – *Injeções Flexíveis para Selamento Definitivo das Infiltrações das Estruturas de Concreto de Usinas Hidrelétricas*. MC-Bauchemie, Brasil. Comitê Brasileiro de Barragens, XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Goiânia, 11 a 15 de Abril de 2005.

[37] MC BAUCHEMIE – *Sistemas de Injeção - Soluções para Impermeabilização e Reparo de Estruturas*. Catálogo disponível online em www.mc-bauchemie.com.br (Janeiro de 2016).

[38] BASF - Master Builders Solutions – Fichas técnicas de produtos. Disponível online em www.master-builders-solutions.basf.es/es-es/productos (Janeiro de 2016).

[39] ALMEIDA JUNIOR, Waldomiro – *Sistemas de Injeção para Estancamento de Infiltrações e Recomposição de Estruturas de Concreto de Usinas Hidrelétricas*. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Abril de 2008.

[40] GOMES, Carlos Filipe Guerreiro Gomes – *Túnel Ferroviário do Rossio - Acompanhamento e Análise das Obras de Reabilitação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. IST, Dezembro de 2008.

[41] RIBEIRO, Maria Sofia – *Reposição e Injecção de Betão em Estruturas de Betão*. DuratiNet – Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network, 2009-2011.

[42] SIKA - *Crack Repair & Injection Resins*. Fichas técnicas de produtos de injeção disponíveis online em <https://usa.sika.com/en/repair-protection/02a002/02a013/02a007.html> (Novembro de 2015).

[43] BASF - Fichas técnicas de produtos de injeção disponíveis online em <http://product-finder.basf.com/group/corporate/product-finder/en/> (Dezembro de 2015).

[44] MAPEI – *Reparação de Betão Fissurado Mediante Derrame e Injeção*. Fichas técnicas de produtos disponíveis online em www.mapei.com/PT-PT (Dezembro de 2015).

ANEXO A

Definições da EN 1504-1 [21]

A EN1504-1 define os termos relacionados com os produtos e sistemas para reparação, para utilização na manutenção e protecção, reabilitação e reforço de estruturas de betão.

Apresentam-se alguns termos e definições, presentes no ponto 3 (**3.1 Generalidades / 3.2 Principais categorias de produtos e sistemas / 3.3 Principais tipos químicos e principais constituintes dos produtos e sistemas para a protecção e reparação**) relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Desempenho (3.1.4) – capacidade de um produto ou sistema fornecer uma protecção ou reparação efectiva e durável sem efeitos nocivos na estrutura original, noutras estruturas, nos operários da construção, nos utilizadores, em terceiras partes e no ambiente.

Requisitos de desempenho (3.1.5) – propriedades mecânicas, físicas e químicas requeridas aos produtos e sistemas que garantem estabilidade e durabilidade tanto ao betão reparado com à estrutura.

Ensaio de desempenho (3.1.6) – ensaio destinado a verificar um valor da propriedade requerida ao produto ou sistema em termos do seu desempenho durante a aplicação e utilização.

Produtos e sistemas de reparação não estrutural (3.2.3) – produtos e sistemas que, quando aplicados numa superfície de betão, restauram os aspectos geométricos ou estéticos da estrutura.

Produtos e sistemas de reparação estrutural (3.2.6) – produtos e sistemas aplicados a uma estrutura de betão para substituir betão defeituoso e restaurar a integridade estrutural e a durabilidade.

Produtos e sistemas de injeção (3.2.2) – produtos e sistemas que, quando aplicados numa superfície de betão, restauram a integridade estrutural ou a durabilidade.

Ligantes hidráulicos (H) (3.3.6) – material inorgânico que reage com a água passando por uma reacção de hidratação que produz um material sólido.

Ligantes polimérico reactivo (P) (3.3.12) – ligante em geral de dois componentes, uma base polimérica reactiva e um endurecedor ou catalisador, e que endurece à temperatura ambiente (exemplo: epoxídicos, acrílicos reticuláveis, poliuretanos de um ou dois componentes).

ANEXO B

Injecções em betão - Definições relevantes da EN 1504-5 [13]

Tempo de vida útil dos produtos de injeção (3.4) – Período de tempo que o produto recentemente misturado leva a aumentar a temperatura de 15°C, para os produtos de injeção com ligantes reactivos poliméricos (ou o máximo aumento de temperatura se este for menor que 15°C), ou registar uma diminuição da estabilidade de filtração, para os produtos de injeção com ligantes hidráulicos.

Tempo de trabalhabilidade dos produtos de injeção (3.5) – Período de tempo durante o qual o produto de injeção fica aplicável nas quantidades utilizadas nas condições limite para as quais o produto está previsto. O tempo de trabalhabilidade é avaliado determinando o tempo de vida útil e é equivalente a 70% deste tempo de vida útil, na ausência de outras recomendações.

ANEXO C

Tabela 20 - Correspondência entre documentos normativos europeus e nacionais (adaptado de [13])

Norma Europeia (EN)	Norma Nacional (NP ou NP EN)	Título
EN 196-2:2005	NP EN 196-2:2006	Métodos de ensaio de cimentos - Análise química dos cimentos.
EN 196-3:2005	NP EN 196-3:2006	Métodos de ensaio de cimentos - Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.
EN 445:1996	NP EN 445:2000	Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço - Métodos de ensaio.
EN 1543:1998	NP EN 1543:2000	Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Métodos de ensaio - Determinação do desenvolvimento da resistência à tracção nos polímeros.
EN ISO 9514	NP EN ISO 9514:1996	Tintas e vernizes - Determinação do tempo de vida útil dos sistemas líquidos - Preparação e acondicionamento das amostras e linhas de orientação para ensaio.

ANEXO D

Tabela 21 - Princípios e métodos para a protecção e reparação de estruturas de betão (adaptado de [5])

Princípio	Exemplos de métodos baseados nos princípios	Parte relevante da EN 1504
Princípios e métodos relacionados com defeitos no betão		
1. Protecção contra o ingresso	1.1. Impregnação hidrofóbica	2
	1.2. Impregnação	2
	1.3. Revestimento	2
	1.4. Ligação superficial de fendas	
	1.5. Enchimento de fendas	5
	1.6. Transformação de fendas em juntas	
	1.7. Ereção de painéis externos	
	1.8. Aplicação de membranas	
2. Controlo da humidade	2.1. Impregnação hidrofóbica	2
	2.2. Impregnação	2
	2.3. Revestimento	2
	2.4. Ereção de painéis externos	
	2.5. Tratamento electroquímico	
3. Restauração do betão	3.1. Argamassa aplicada à mão	3
	3.2. Novo betão ou argmassa cofrado	3
	3.3. Betão ou argmassa projectado	3
	3.4. Substituição de elementos	
4. Reforço estrutural	4.1. Adição ou substituição de armaduras externas ou embebidas	
	4.2. Adição de armaduras ancoradas em furos abertos ou a abrir	6
	4.3. Reforço com placas coladas	4
	4.4. Adição de argamassa ou betão	3; 4
	4.5. Injecção de fendas, vazios ou interstícios	5
	4.6. Enchimento de fendas, vazios ou interstícios	5
	4.7. Pré-esforço (pós-tensionamento)	
5. Resistência física	5.1. Revestimento	2
	5.2. Impregnação	2
	5.3. Adição de argamassa	3
6. Resistência química	6.1. Revestimento	2
	6.2. Impregnação	2
	6.3. Adição de argamassa ou betão	3
Princípios e métodos relacionados com a corrosão das armaduras		
7. Preservação ou restauração da passividade	7.1. Impregnação hidrofóbica	3
	7.2. Impregnação	3
	7.3. Revestimento	
	7.4. Ligação superficial de fendas	
	7.5. Enchimento de fendas	
8. Aumento da resistividade	8.1. Impregnação hidrofóbica	2
	8.2. Impregnação	2
	8.3. Revestimento	2
9. Controlo catódico	9.1. Limitação do teor de oxigénio (no cátodo) por saturação ou revestimento	
10. Protecção catódica	10.1. Aplicação de potencial eléctrico	
11. Controlo das áreas anódicas	11.1. Revestimento activo da armadura	7
	11.2. Revestimento barreira da armadura	7
	11.3. Aplicação de inibidores de corrosão	

ANEXO E

Tabela 22 - Produtos de resinas epoxídicas para injeção de fissuras com propriedades semelhantes à Tabela 11

Produto	Designação	w _{min} da fissura	w _{máx} da fissura	Viscosidade (aprox. 20°C)	Resistência à compressão (aprox. 7d)	Resistência à tracção (aprox. 7d)	Fornecedor
Epóxi "Tipo A"	Sikadur-52 Injection	n.d.	5 mm	430 mPa.s	52 MPa	37 MPa	SIKA
	Epojet	0.1 mm	n.d.	380 mPa.s	90 MPa	44 MPa	MAPEI
	MasterInject 1360	0.1 mm	5 mm	335 mPa.s	80 MPa	60 MPa	BASF
	MC-Injekt 1264 compact	0.3 mm	n.d.	300 mPa.s	60 MPa	46 MPa	MC BAUCHEMIE
Epóxi "Tipo B"	Epojet LV	0.1 mm	n.d.	140 mPa.s	70 MPa	39 MPa	MAPEI
	Sika Injection-451	0.2 mm	5 mm	100 mPa.s	73 MPa	50 MPa	SIKA
	MC-Injekt 1264 TF-T	0.1 mm	n.d.	145 mPa.s	75 MPa	65 MPa	MC BAUCHEMIE

Legenda: n.d. – informação não disponível na ficha técnica do produto

Tabela 23 - Produtos de espumas de poliuretano para injeção de fissuras

Produto	Designação	w _{min} da fissura	w _{máx} da fissura	Viscosidade (aprox. 20°C)	Expansão livre em contacto com água	Fornecedor
Espumas de PU "normais"	Sika Injection-101-RC	n.d.	n.d.	155 mPa.s	até 40 vezes	SIKA
	Sika Injection-105-RC	n.d.	n.d.	210 mPa.s	até 15 vezes	
	Sika Injection 20	n.d.	n.d.	180 mPa.s	n.d.	
	Foamjet F	n.d.	n.d.	200 mPa.s	até 30 vezes	MAPEI
	Foamjet T	n.d.	n.d.	400 mPa.s	até 10 vezes	
	MasterRoc MP 355 1K	n.d.	n.d.	320 mPa.s	até 30 vezes	BASF
	MC-Injekt 2033	0.2 mm	n.d.	400 mPa.s	até 40 vezes	MC BAUCHEMIE
Espumas de PU rígidos	MC Injekt 2700*	n.d.	n.d.	200 mPa.s	até 10 vezes	MC BAUCHEMIE
	MC Injekt 2700 L*	n.d.	n.d.	200 mPa.s	até 10 vezes	
	MC Injekt 2700 UW#	n.d.	n.d.	230 mPa.s	até 10 vezes	

Legenda: n.d. – informação não disponível na ficha técnica do produto
 * Resistência à compressão (aprox. 7d) – 40 MPa
 # Resistência à compressão (aprox. 7d) – 60 MPa

Tabela 24 - Produtos de resinas de gel de PU para injeção de fissuras com propriedades semelhantes à Tabela 12

Produto	Designação	w _{min} da fissura	w _{máx} da fissura	Viscosidade (aprox. 20°C)	Fornecedor
Gel PU "Tipo A"	Sika Injection-201	0.2 mm	n.d.	100 mPa.s	SIKA
	MC Injekt 2300 NV	n.d.	n.d.	100 mPa.s	MC BAUCHEMIE
Gel PU "Tipo B"	Sika Injection-203	0.2 mm	n.d.	180 mPa.s	SIKA

Legenda: n.d. – informação não disponível na ficha técnica do produto

Tabela 25 - Produtos de resinas de gel acrílico para injeção de fissuras com propriedades semelhantes à Tabela 13

Produto	Designação	w _{min} da fissura	w _{máx} da fissura	Viscosidade (aprox. 20°C)	Fornecedor
Gel Acrílico "Tipo A"	Sika Injection-304	n.d.	n.d.	7 mPa.s	SIKA
Gel Acrílico "Tipo B"	MasterRoc MP 303	n.d.	n.d.	5 mPa.s	BASF
Outros produtos Gel Acrílico	Mapegel UTT System	n.d.	n.d.	≤ 20 mPa.s	MAPEI
	MC-Injekt GL-95 TX*	n.d.	n.d.	30 mPa.s	MC BAUCHEMIE
	Sika Injection-305	n.d.	n.d.	12 mPa.s	SIKA
	Sika Injection-306	n.d.	n.d.	11 mPa.s	

Legenda: n.d. – informação não disponível na ficha técnica do produto
*Temperatura mínima de aplicação - 1°C

Tabela 26 - Produtos de microcimentos para injeção de fissuras

Produto	Designação	w _{min} da fissura	w _{máx} da fissura	Fluidez (cone Marsh)	Resistência à compressão		Fornecedor
					7 dias	28 dias	
Produtos de Microcimento	Sika InjectoCem190	n.d.	n.d.	*	44 MPa	47 MPa	SIKA
	MasterFlow 910	n.d.	n.d.	≤ 9 seg.	50 MPa	60 MPa	BASF
	Centricrete FB	0.5 mm	n.d.	67 seg.	34 MPa	45 MPa	MC BAUCHEMIE
	Centricrete UF	n.d.	n.d.	50 seg.	34 MPa	42 MPa	

Legenda: n.d. – informação não disponível na ficha técnica do produto
*Viscosidade - 100 mPa.s