



Projeto

Mestrado em Engenharia Conceção e Desenvolvimento do Produto

***Estudo de Materiais Estruturais de base Polimérica
para Reforço de Estruturas em Betão***

Pedro Filipe Carvalho Costa

Leiria, *Março* de 2015



Projeto

Mestrado em Engenharia Conceção e desenvolvimento do Produto

***Estudo de Materiais Estruturais de base Polimérica
para Reforço de Estruturas em Betão***

Pedro Filipe Carvalho Costa

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Pedro Miguel Gonçalves Martinho, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação da Doutora Fátima Maria Carvalhinhas Barreiros, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Março de 2015

Dedicatória

Dedico este trabalho, aos meus pais e á minha namorada Rita.

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta tese, em especial á minha namorada por todo o apoio, compreensão e dedicação ao longo deste estudo, e aos meus pais pela sua força e incentivo e um especial agradecimento aos meus orientadores, doutor Pedro Martinho e doutora Fátima Barreiros pela sua disponibilidade.

Resumo

Vivemos na era das cidades de betão e cada vez mais a nível mundial se aplica este tipo de material. Na construção civil o betão é o material predominante produzido através de uma mistura de diversas matérias-primas, sejam naturais ou sintéticas, permitindo várias formas estruturais, desde as regulares às mais excêntricas, e é com enorme facilidade que o betão preenche os moldes ou cofragens.

O ser humano, valendo-se da ambição e necessidade de superar novos desafios muitas vezes impostos por novas ideias, por questões levantadas pela arquitetura e pela engenharia, procurou desenvolver novos tipos de betão capazes de dar resposta a estas exigências e ser também cada vez mais uma matéria nobre da construção.

Como tal, e sabendo que o betão também apresenta características que podem limitar a sua aplicação, tais como: baixa resistência à tração, diminuta ductilidade, elevada densidade dos elementos estruturais (significativamente superior ao das estruturas de aço com a mesma capacidade de carga) e vulnerabilidade à penetração de substâncias nocivas que aceleram o processo de corrosão das armaduras, ainda há margem para progressos no estudo do betão e possibilidade de desenvolver as suas propriedades mecânicas.

Assim, ao longo do presente trabalho estudou-se e compreendeu-se as potencialidades do betão e as mais-valias e valências do betão reforçado com polímero, aliado aos reais benefícios na aplicabilidade deste material na construção.

Palavras-chave:

Betão, betão polimérico, resinas epóxi, ensaio de flexão, ensaio de compressão.

Abstract

We live in an era that is surrounded by concrete cities, increasingly global and where worldwide level applies this material. In construction this material is very predominant, produced by a mixture of various raw materials such as natural or composite materials, that allows various structural forms from regular to the most eccentric, and it is with great ease that the concrete fills the molds or formwork.

Given the characteristics of the concrete, the human being, drawing on ambition seeks to overcome new challenges that are imposed, due to the demanding conditions, challenging ideas and issues raised by the science of architecture and engineering sought to develop new types of concrete that are able to respond these requirements and is also increasingly being the construction material of master.

As such, and knowing that the concrete has characteristics that limit some of the challenges, such as tensile strength, ductility miniature, high density shown in the structural elements, which is significantly higher than that of steel structures with the same load capacity, and will be vulnerable to penetration of harmful substances that accelerate the process of reinforcement corrosion.

Thus, throughout this thesis we have studied and understood if the capacities of concrete and capital gains and valences of concrete polymer matrix and the real benefits in applicability in construction, thus demonstrated the evolution of material properties.

Keywords:

Concrete, polymer concrete, epoxy resins, flexion test, compression test.

Lista de Figuras

Figura 1 - Aqueduto Pont du Gard.

Figura 2 - Basílica de Constantino.

Figura 3 – Pantheon Romano.

Figura 4 – Barco de Lambot.

Figura 5 – Sistema Hennebique – Pormenor estrutural e imagens de vigas aplicadas com o sistema Hennebique de um armazém em Lisboa.

Figura 6 – Edifício Medical Arts Building.

Figura 7 – Agregado britado comum usado na execução de estruturas de betão.

Figura 8 – *Two Union Square*, Seattle, EUA.

Figura 9 – *Petronas Towers*, Kuala-Lumpur, Malásia.

Figura 10 – Ponte Vasco da Gama, Lisboa.

Figura 11 – Edifício do “Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança” do porto de Lisboa.

Figura 12 – Prismas de betão reforçados com fibras de aço.

Figura 13 - Mecanismo de reforço de fibra atuando como ponte de transferência de tensões.

Figura 14 - Segmentos de tuneis em betão reforçado com fibras de aço.

Figura 15 – Mobiliário urbano em betão reforçado com fibras de vidro.

Figura 16 – Esquema de produção de betão polimérico impregnado.

Figura 17 - Micrografia de betão convencional (direita) e betão modificado com látex (esquerda).

Figura 18 - Argamassa com resina epóxi misturada.

Figura 19 – Molde madeira de provetes prismáticos com betão convencional e betão polimérico.

Figura 20 – Provetes prismáticos imersos em água.

Figura 21 - Equipamento de ensaio flexão com provete pronto para ensaio.

Figura 22: Esquema do ensaio de flexão.

Figura 23: Equação do ensaio de flexão.

Figura 24 – Ensaio à flexão do betão convencional hidratado fora de água.

Figura 25 – Ensaio à flexão do betão polimérico hidratado fora de água.

Figura 26 – Ensaio à flexão do betão convencional hidratado dentro de água.

Figura 27 – Ensaio à flexão do betão polimérico hidratado dentro de água.

Figura 28: Equipamento de ensaio compressão com provete pronto para ensaio.

Figura 29: Equação do ensaio de flexão.

Figura 30 – Resultados dos testes compressão.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características de algumas adições minerais para betão.

Tabela 2 - Comparação das propriedades do betão polimérico e convencional.

Tabela 3 - Aplicações e vantagens do concreto polimérico.

Tabela 4 – Propriedade dos betões.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas comuns num betão de matriz polimérica

Tabela 5 - Propriedades dos vários tipos de betão polimérico.

Tabela 7 - Tempo mínimo de cura do betão, relativamente ao fato água/cimento.

Índice

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS (<i>FACULTATIVO</i>)	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
ÍNDICE	XV
1.INTRODUÇÃO	1
1.1.Nota Introdutória	1
1.2.Objectivos	2
1.3.Organização do Trabalho	3
2.ESTADO DA ARTE	5
2.1.Enquadramento Histórico	5
2.2.Características do Betão	14
2.2.1.Considerações Gerais	15
2.2.2.Materiais Constituintes do Betão	16
2.3.Betão de Elevado Desempenho	21
2.3.1.Materiais, Dosagens e Características	22
2.3.2.Aplicações	25
2.4.Betão à Base de Fibras	28
2.4.1.Tipos de Fibras Disponíveis	29
2.4.2.Aplicações	34
2.5.Betão Polimérico	35
2.5.1.Constituição do Betão Polimérico	37
2.5.2.Matriz Polimérica	39
2.5.3.Agregados	41
2.5.4.Mistura	43
2.5.5.Propriedades do Betão Polimérico	44
2.5.6.Tipos de Betão Polimérico	45
3.PARTE EXPERIMENTAL	51
3.1.Introdução	51

3.2.Preparação dos Provetes	52
3.2.1.Materiais	53
3.2.2.Mistura	53
3.3.Ensaio de Resistência à Flexão	57
3.3.1.Considerações Gerais	57
3.3.2.Resultados e Discussão dos Ensaio à Flexão	59
3.4.Ensaio de Compressão	62
3.4.1.Considerações Gerais	62
3.4.2. Resultados e Discussão	64
4.CONCLUSÃO	66
Trabalho Futuro	67
BIBLIOGRAFIA	68
ANEXOS	70
GLOSSÁRIO	72

1. Introdução

1.1 Nota introdutória

A constante evolução da construção e as exigências da arquitetura e da engenharia civil levaram à evolução do betão de forma a dar resposta às diversas variáveis levantadas na área da construção, nomeadamente a durabilidade do betão, a necessidade de aumento da capacidade de compressão, fruto de projetos arquitetónicos mais arrojados, e a resistência ao ataque químico.

O betão comum é um material que responde muito bem às exigências da construção, sendo um material barato e prático face às necessidades requeridas. Contudo, não consegue ser totalmente eficaz em determinados campos específicos da construção. Daí que ao longo das últimas décadas tenham surgido determinados tipos de betão com características e propriedades mais avançadas que permitem dar resposta a solicitações que o betão convencional não consegue alcançar, como é o caso do betão reforçado com polímeros, destacando as seguintes características:

- Excelentes propriedades mecânicas;
- Elevada estabilidade dimensional;
- Rápida fixação;
- Elevada resistência estática e dinâmica;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Excelente durabilidade;
- Resistência à corrosão e ataques químicos;
- Elevada permeabilidade.

Na verdade, durante o processo de hidratação do cimento, fase em que o betão endurece e ganha consistência, formam-se pequenos espaços entre os grãos dos agregados, que permitem a penetração de água na estrutura do cimento danificando-o. O reforço do betão com recurso a determinados polímeros, como

resinas epoxídicas, poliéster ou vinílicas, por exemplo, permite, durante o processo de hidratação, unir os agregados, preenchendo assim os poros, tornando assim o betão mais impermeável e protegendo-o contra reações químicas ou efeitos secundários que o excesso de água pode causar na sua estrutura. Assim, as características de alguns materiais poliméricos permitem incrementar no betão determinadas propriedades que respondem às necessidades técnicas solicitadas a este material. Em comparação com o betão convencional, o betão reforçado com polímeros apresenta boa resistência ao ataque químico de agentes corrosivos, baixa absorção de água, boa resistência à abrasão e demarcada resistência à congelação e descongelação. Dada a maior resistência dos betões com reforço polimérico em relação aos betões convencionais, é possível reduzir a secção de peças produzidas, permitindo assim também uma melhor proteção do interior das estruturas em betão, o que posiciona o betão reforçado com polímeros num campo mais competitivo, quando comparado com o betão de cimento tradicional, em certas aplicações especiais [1]. As propriedades dos polímeros, durante o processo de hidratação do betão, permitem o desenvolvimento de um filme polimérico que envolve os agregados do betão ocupando os poros, modificando assim a resistência química e as propriedades físicas do betão. Como o betão de matriz polimérica apresenta uma grande resistência à compressão comparando com o betão de cimento Portland, posicionando o betão reforçado com polímeros num patamar mais competitivo que o betão convencional, particularmente em aplicações que requerem elevado desempenho [1]. Já as propriedades viscoelásticas do polímero de ligação são responsáveis pelos elevados valores de fluência, o que constitui um dado restritivo do betão com reforço polimérico em aplicações estruturais.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principais objetivos o conhecimento, estudo e análise do betão reforçado com polímeros, salientando as respetivas propriedades e vantagens em relação ao betão convencional.

Contudo, dada a vasta informação, este trabalho reúne diversos tópicos que descrevem outros tipos de betão que, tal como o betão reforçado com polímeros, demonstram a alternativa ao betão convencional, podendo ser estudados já que ajudam a compreender todas as propriedades inerentes ao betão e respetiva aplicabilidade, nos demais projetos.

Neste estudo vai ser demonstrado, recorrendo a testes de ensaios mecânicos, que o betão com adição de um material polimérico consegue adquirir características e propriedades que o betão convencional não possui, como por exemplo, melhor impermeabilidade, melhor resistência mecânica e maior durabilidade, uma vez que o polímero ao aumentar a impermeabilidade aumenta também a capacidade de resistência ao ataque químico.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho divide-se em 4 capítulos.

No primeiro capítulo é efetuada uma pequena introdução ao betão de matriz polimérica, sendo descritos os principais objetivos do trabalho e apresentada alguma informação sobre o conteúdo do trabalho.

No segundo capítulo é feito um enquadramento histórico do betão, material que serve de base a todo o estudo e análise. Neste capítulo é referido, para além das características base do betão, alguns tipos de betões com características especiais, sendo dado um especial enfoque ao betão polimérico, em particular no que se refere aos constituintes, características mecânicas e tipos de betão polimérico.

No terceiro capítulo são descritos os ensaios experimentais, sendo apresentados os principais resultados e efetuada a respetiva análise e discussão.

Finalmente, no último capítulo, são apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado da arte

2.1 Enquadramento histórico

Há milhares de anos que o betão e as argamassas são utilizados como materiais de construção tendo como base matérias-primas como a argila, ou argila margosa, areias, cascalho e água. O pavimento simples em betão tem um registo histórico de 5600 AC em LepenskiVin [2].

O betão armado, como é conhecido hoje, pode ser considerado um material recente, apesar dos sistemas de construção mais usados até ao final do século XIX, serem compostos por estruturas em madeira e alvenaria. A madeira era uma matéria abundante na época, no entanto, apresentava problemas de durabilidade e de combustibilidade acabando por ser a causa de desastres nalgumas cidades. A alvenaria, composta por pedras ou tijolos, era na época o sistema estrutural empregado nas obras mais importantes. De uma forma geral, a alvenaria pode ser definida como um sistema construtivo que consiste na modelação de unidades (pedras, tijolos ou blocos) unidas por um ligante, a argamassa. A alvenaria composta por pedras é, sem dúvida, um dos mais antigos sistemas construtivos utilizados pelo homem. O tijolo foi apenas um produto de substituição, usado inicialmente em regiões onde havia escassez de pedra natural e da madeira. Dados históricos mostram evidências que esta descoberta terá ocorrido na Mesopotâmia, uma vez que existe o relato da descoberta de tijolos de barro modelados manualmente na região do rio Nilo datados de 14.000 a.C. e de tijolos queimados com uma cronologia aproximada de 5000 a.C. [3].

Nas primeiras experiências com alvenaria de pedras, as civilizações procuraram um material que unisse as pedras de forma coesa. Começaram por usar a argamassa de barro (os assírios e babilônios utilizaram como material ligante a argila) e por fim uma argamassa mais resistente e durável, ou seja, a argamassa de cal. Neste contexto, iniciou-se a história da cal, do cimento e do betão como

ligantes de argamassas de alvenarias [3]. A mais antiga aplicação da cal como ligante foi encontrada na Sérvia, nas ruínas de uma casa datada de 5600 a.C., com o piso feito de cal vermelha, areia e pedra. No entanto, este material começou a aparecer mais frequentemente nas construções a partir da civilização egípcia. Na Pirâmide de Quéops (2.700 a.C.) o material de vedação demonstrou que os egípcios tinham experiência na aplicação de argamassas de cal. No caso da pirâmide do faraó egípcio Tutancâmon (1.450 a.C.) existe uma porta construída com enormes pedras, rebocadas a argamassa, e na antecâmara existia um reservatório com a argamassa utilizada para rebocar a porta. Assim, pode-se considerar que o cimento tal como é conhecido hoje em dia teve origem em 2500 a.C. [3].

O conhecimento do cimento difundiu-se pelos povos do Oriente e mais tarde pelo Mediterrâneo, Grécia e Roma. Prova disso, no Palácio de Knossos (2.000 a.C.) em Creta, foram descobertos locais revestidos com duas camadas de argamassa com cal e fibras de cabelo, utilizadas tal como nos frescos. Existem também dados de que os Romanos fizeram tentativas para armarem o betão com cabos de bronze, experiências que não tiveram sucesso devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica do bronze e do betão [3].

A cerca de 23 km de Jerusalém, em Jericó, foi construída uma muralha utilizando argamassa, com a finalidade de proteger a cidade (1000 a.C.). No mediterrâneo, no século III a.C., era dominado por duas cidades-estado, Cartago em África e Roma na Europa. Os romanos antigos eram um povo pragmático, tinham uma mentalidade recetiva e aberta a novas inovações, adaptaram às próprias necessidades, copiando e melhorando o seu uso do que conquistavam aos povos o que achavam útil. Consequentemente, esta mentalidade resultou numa poderosa indústria de construção, com leis específicas para controlar os aspetos de construção e normas de serviços de mão-de-obra muito semelhante ao serviço militar. Os romanos definiram regulamentos específicos para o controlo de qualidade dos materiais, passando a ser obrigatório o uso de marcas em tijolos e blocos.

Assim, desta forma, conseguiram unificar técnicas construtivas em todo o império, respeitando sempre as vantagens dos sistemas construtivos locais.

Roma, tal como outras cidades, funcionava como a cidade para lazer das elites romanas ou de núcleos administrativos dos territórios conquistados, necessitando de soluções construtivas para uma grande variedade de tipologias, como pontes, armazéns, portos, circos templos, termas, acampamentos militares, aquedutos ou moradias, para além de estradas que ligassem as outras cidades a Roma.

Desde 600 a.C. os romanos já usavam cal como aglomerante, no entanto, a descoberta que permitiu um grande avanço da engenharia romana, que possibilitou que as cidades romanas adotassem infraestruturas necessárias há época, foi um material novo, o Opus Caementicium. Era composto por cinza pozolânica que misturada com argamassa de cal permitiu produzir um material muito semelhante ao cimento atual [3]. A descoberta da argamassa com caementum permitiu um avanço na engenharia na altura, viabilizando o uso desta técnica para construir o aqueduto Pont du Gard, e a maior parte das construções romanas, como o Coliseu, as famosas Termas e banhos Romanas (a maior chegou a ter 140mil m²), a Basílica de Constantino, para além de outros prédios, aquedutos e várias estradas.



Figura 1 - Aqueduto Pont du Gard [4].

A Pont du Gard (Figura 1) é uma parte de um aqueduto construído no sul de França, perto de Remoulins, na segunda metade do século do II, com um comprimento de 275 m com 49 m de altura e 6,36 m de largura. Tal como o aqueduto Pont du Gard, a Basílica de Constantino (308-312 d.C.) foi um dos mais

impressionantes edifícios Romanos. Com planta retangular e cerca de 6500 m² era constituída por uma nave central, 2 corredores laterais e um átrio, sendo este a entrada principal. Contudo, no terramoto de 847 d.C. apenas ficou de pé o edifício original (Figura 2).



Figura 2 - Basílica de Constantino [5].

Em 27 A.C. foi contruído o Pantheon (Figura 3), um templo direcionado para os deuses Romanos, o único construído na era greco-romana e que ainda se encontra em perfeito estado de conservação. Com base cilíndrica ficou famoso pela sua cúpula de 43 m de diâmetro, igual à altura, dando virtualmente a ilusão de esfera. No interior, uma série de alvéolos em torno do óculo central, com uma função estética, permitiu a redução de espessura do cimento.

Para a obtenção de um material impermeável, estanque, resistente e de simples conformação, o cimento foi fundamental para responder às características necessárias à construção [3]. O cimento foi um material muito usado pelos romanos na construção de estradas, aquedutos e termas, no entanto, nalguns casos, foi usado apenas como aglomerante para argamassas estanques, impermeáveis ou noutros casos para a preparação de um material mais resistente, o betão, como foi o caso da cúpula do Pantheon (Figura 3).



Figura 3 – Pantheon Romano [6].

O desenvolvimento do betão e a aplicação de agregados leves durante o Império Romano tiveram um notável desenvolvimento tecnológico, contudo este conhecimento ficou perdido durante a idade média sendo apenas usado para fundações até ao século XVIII.

Em 1824 Joseph Aspdin dá a conhecer o desenvolvimento de aplicações do betão nas construções. Os primeiros fornos rotativos que permitiram baixar o custo de produção do betão surgiram em 1885, contudo, em Portugal, só em 1894 se iniciou a indústria do cimento com a fábrica de cimento Tejo em Alhandra, atualmente Cimpor.

A partir de então, o betão ganha uma nova dinâmica na arquitetura, não só em fundações, como nos últimos séculos, mas também em pavimentos e paredes [4]. As primeiras referências do betão armado referem-se a 1830, na construção de um barco que foi reconhecida como a obra mais antiga em 1848. Este projeto foi apresentado na exposição universal de Paris em 1855 e ainda se encontra preservado (Figura 4).

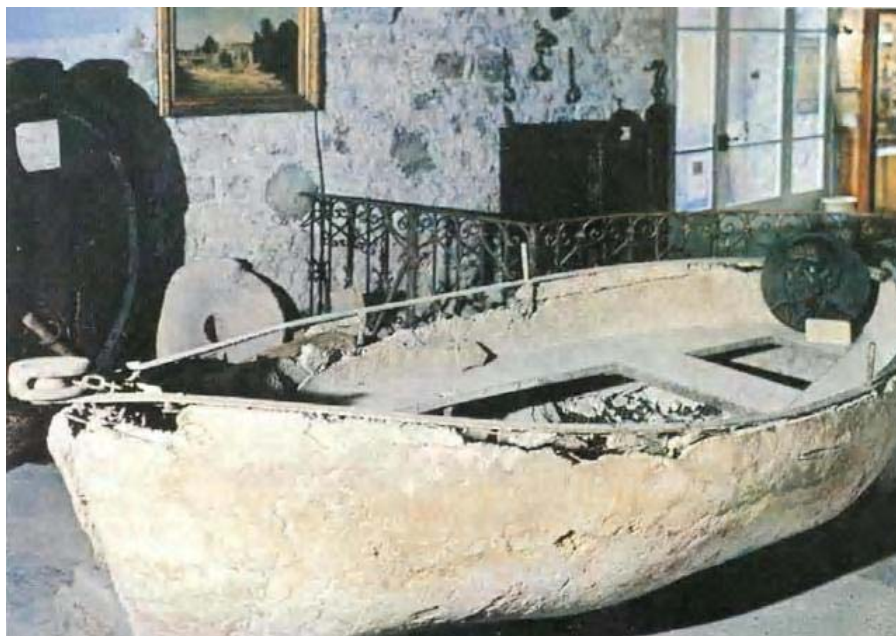


Figura 4 – Barco de Lambot [4].

Os pavimentos de betão armado foram introduzidos na construção civil em 1852 por Francois Coignet e por William Wilkinsen em 1854 e, desde então, tornou-se na maior aplicação deste material quer seja em lajes, vigas ou paredes iniciando assim desde então a massificação deste material na construção civil.

François Coignet (1814 – 1888), engenheiro químico, construiu, em 1851, juntamente com os irmãos Louis e Stéphane Coignet, em Paris, a segunda fábrica para produção de betão que patenteou em 1854. Em 1853 apresentou uma casa de betão que construiu em Saint-Denis, Paris, demonstrando assim, que o tipo de betão desenvolvido poderia ser aplicado como substituto da pedra natural. Desta forma dedicou-se ao estudo do betão para a construção de edifícios, executando assim inúmeras obras de grandes dimensões em betão armado, tais como a Maison de Garde au de Bois Vincennes, a igreja em Le Vésinet perto de Paris, construída em parceria com o arquiteto Louis-Charles Boileau, ou o aqueduto do Vanne com cerca de 136 km e sendo que alguns arcos chegaram a ter 40 m de altura [4]. O tipo de betão usado por Coignet era similar ao dos antigos romanos, com areia, cal, cimento, água e armação em aço. No início do século XX a tecnologia do betão armado na indústria da construção de uma forma sistemática

e ainda ao fim do século XVIII de forma pontual e experimental é alvo de um extraordinário desenvolvimento tanto na compreensão do funcionamento como nas inúmeras possibilidades de utilização. Assim, com a especialização dos processos do betão armado, a indústria da construção começou a aceitar este material, tendo em atenção as garantias das capacidades de resistência, de carga e suportes a temperaturas altíssimas, levando a que associadamente sejam publicadas varias patentes e bases de cálculo e estruturas desenvolvidas, sendo, que dessas inúmeras patentes distingue-se o sistema Hennebique com data de 1892 que passa a ser aplicado em diversos países, tanto que em 1910 já existiam cerca de 40 000 obras que recorreram a esta técnica [4]. Este sistema estrutural é caracterizado pela aplicação de estribos nas vigas, que ligavam as varas de aço à zona de betão comprimido. Este sistema era constituído pela ligação de chapas de aço de secção retangular em forma de U (Figura 5).

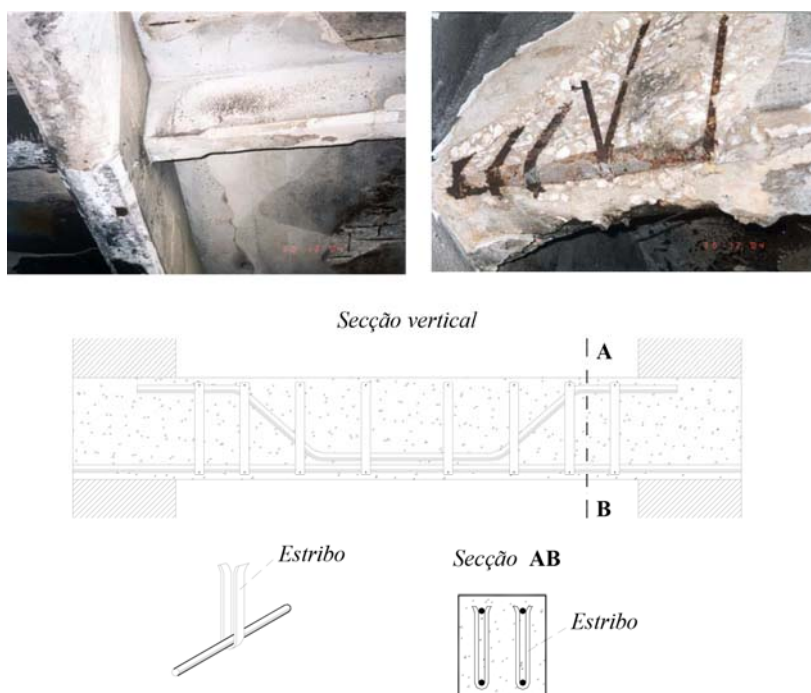


Figura 5 – Sistema Hennebique – Pormenor estrutural e imagens de vigas aplicadas com o sistema Hennebique de um Armazém em Lisboa [4].

François Hennélique (1842 - 1921) foi também um engenheiro francês que se distinguiu no ensaio de várias formas de ferragens para reforçar o betão. Influenciado pela estrutura com malha de arame que Joseph Monier usou na exposição de Parias em 1867 para executar tubos e tanques em betão,

Hennebique deu início á experimentação e evolução deste material na construção de edifícios, desenvolvendo lajes em betão armado, sistemas que patenteou em 1886, sendo o primeiro sistema construtivo em ferro e betão, direcionado quase exclusivamente para lajes e pavimentos. Este sistema de construção seria um concorrente direto das lajes metálicas e Hennebique destacou as vantagens e métodos construtivos em comparação com outros sistemas [4].

O betão ganhou um grande mercado no final do século XIX em detrimento da alvenaria e do aço, o que possibilitou construir grandes edifícios em altura.

A evolução do betão ao longo do século XIX foi documentada em artigos publicados na revista de Obras Publicas, juntamente com vários trabalhos científicos sobre betão armado e onde vários autores foram envolvidos, reforçando o constante desenvolvimento deste material na construção civil e nas estruturas de betão leves, resistentes e elegantes, tornando-se assim o material mais usado no mundo interior para a construção.

Emil Mörsch, engenheiro alemão, foi um dos mais importantes e pioneiros investigadores do betão armado, que desenvolveu algumas teorias com base científica sobre o betão armado e tornaram se referência, após a publicação de um artigo científico em 1901. A base da sua teoria está no modelo de treliça que ainda hoje é uma modelo utilizado, considerado fiável e pratico para a análise, dimensionamento e detalhe das estruturas do betão armado usado para a fundamentação do comportamento de vigas de betão armado submetidas à flexão e torsão [3].

O Edifício Medical Arts Building (Figura 6), em Dallas, nos Estados Unidos da América, construído entre 1902 e 1903, é reconhecido como o primeiro edifício comercial construído em betão armado em altura, com cerca de 85 m de altura, que no entanto, gerou alguma polémica na época. Alguns engenheiros afirmaram não ser possível o edifício aguentar os ventos e a retração do betão. No entanto, em 1975 foi considerado património histórico nacional e ainda se encontra em uso aos dias de hoje.



Figura 6 – Edifício Medical Arts Building [3].

A maioria dos engenheiros Europeus, como Hennebique, não estandardizou a aplicação do betão armado na construção, como fizeram os construtores americanos, que direcionaram unicamente a construção para o betão armado. Assim, o desenrolamento da produção do betão armado em fábrica no início do século XX permitiu flexibilizar e organizar a construção de edifícios, bem como potenciar novas arquiteturas. Atualmente o cimento difere substancialmente dos cimentos de há 40 anos, principalmente no que consiste na composição e granulometria. Segundo o estudo de Prince e Tennis [7, 8], o cimento Portland, que é obtido a partir de uma mistura de calcários, argilas e outros constituintes ricos em sílica, aumentou os valores de silicato tricálcico de 30%, valor de 1950 para valores na ordem dos 50% em 1970 e quase 60% em 1998 ao mesmo tempo que o cimento aumentou de 100 para 400 m²/kg. Aliado ao aumento da percentagem de silicato tricálcico a menor granulometria do cimento, a hidratação

é mais rápida. Estas alterações no cimento permitem hoje em dia fabricar betão com resistência á compressão semelhante com uma menor quantidade de água. No entanto, estas alterações podem criar problemas a nível da durabilidade do material, uma vez que a retração por secagem e o calor da hidratação influenciam nesta condição.

Com o ritmo de construção dos anos 50 a indústria do betão pronto emergiu face à necessidade de existir um betão com melhor trabalhabilidade do que o betão produzido em obra, o aumento da dosagem de água causou uma significativa durabilidade do betão. No entanto, os betões prontos de hoje em dia contam com adições minerais e adjuvantes que seguram a trabalhabilidade necessária e mantêm um elevado nível de durabilidade. Nos anos 40 começaram-se a utilizar adjuvantes introdutores de ar, que trouxeram um enorme avanço na durabilidade do betão, reduzindo assim a manutenção de estruturas de betão, apesar das várias evoluções nos últimos cinquenta anos, nenhuma mudança foi verdadeiramente revolucionária na indústria do betão. Apesar da utilização de novos componentes (adjuvantes, adições ativas, etc.) que melhoraram a qualidade dos betões, quer a nível de resistência à compressão quer de durabilidade [9].

2.2 Características do betão

2.2.1 Considerações gerais

O betão tem sido alvo de desenvolvimento por parte de investigadores, com o intuito de desenvolver as suas propriedades, permitido assim a evolução deste material, para poder responder de melhor forma às exigências solicitadas, como composição, fabrico, transporte, colocação em obra e conservação. Ao longo dos últimos anos têm-se registado pequenos avanços, conseguidos à custa da utilização de ligantes, adjuvantes de natureza química e através de uma seleção

mais criteriosa dos agregados. Desta forma, hoje em dia, existem betões com uma elevada resistência mecânica, impermeabilidade, durabilidade, facilidade de modelação e aplicação em obra.

O betão normalmente usado na construção resulta de uma combinação em proporções adequadas, de vários constituintes, como é o caso do cimento, agregados (areia, brita) e água. No entanto, para além destes constituintes podem ser ainda misturados adjuvantes no sentido de melhorar ou alterar determinadas propriedades, consoante as necessidades. Basicamente, desde a combinação dos constituintes, o betão passa por dois estados diferentes, ou seja, o estado fresco e o estado endurecido. No primeiro estado, o betão caracteriza-se pela sua plasticidade, facilidade de trabalhabilidade, nomeadamente no transporte, e facilidade de compactação. Comparado com outros materiais, é relativamente económico, existe em abundância, sendo de fácil adaptação a diferentes formas e diversificado em espaços a encher. Caracteriza-se também pela compatibilidade com outros materiais, como é o caso do aço, permitindo assim outras soluções tecnológicas na construção. Já no segundo estado, que pode ocorrer rapidamente, o betão passa da sua forma plástica, e de fácil manuseamento, para um estado endurecido, sem retorno ao estado plástico, e sem manuseio, que rapidamente eleva a resistência mecânica às solicitações correntes, em particular à compressão e flexão. Estas características tornam o betão versátil, de fácil aplicação e com bons resultados estruturais. No entanto, o betão apresenta algumas desvantagens, como a baixa capacidade de isolamento térmico e impermeabilidade e a elevada densidade, que pode ascender aos 2400 kg/m³, que pode originar aumento das deformações dos vários elementos das estruturas de betão, com o passar do tempo derivado às cargas instaladas [10].

2.2.2 Materiais constituintes do betão

A preparação do betão é a fase mais importante de toda a metodologia de produção, sendo assim muito importante a seleção dos seus constituintes. A preparação deve ser feita com total conhecimento de todas as propriedades dos

seus constituintes quer em fresco quer em estado endurecido, obedecendo á norma europeia NP EN 206-1:2007 [11].

Os constituintes fundamentais do betão são: cimento, adições, agregados, água e adjuvantes. De seguida, faz-se uma breve abordagem a cada um destes constituintes.

Cimento

O cimento é um material inorgânico, e um ligante fundamental do betão, com uma granulometria extra fina que é misturado com água, formando uma pasta que endurece por meio de processos de hidratação, formando compostos estáveis que cristalizam, interligando-se e desenvolvendo assim uma resistência no seu núcleo. Em fresco mantém as características de plasticidade que podem variar com a quantidade de água, mas em estado sólido, mantém a resistência e estabilidade mesmo em contacto com a água.

A produção do cimento é feita através da cozedura a uma temperatura próxima de 1450°, de uma mistura proporcional de calcário de argila. Este processo de cozedura origina reações químicas, que formam compostos aglomerados, designados de Clinquer, que após o arrefecimento serão moídos e transformados em pó. Na fase de moagem do cimento, podem ser adicionadas outras matérias como por exemplo cinzas volantes, pozolanas com a finalidade de aumentar outras propriedades [12].

O cimento é considerado um ligante, pois aquando da mistura da água, as reações permitem o composto cristalizar e ligar-se entre si, ou com outros agregados como areias ou britas, conferindo assim uma elevada coesão e resistência. As propriedades mecânicas do cimento dependem da composição e da granulometria da moagem. Os componentes principais do cimento são o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e o aluminoferrato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), cada um com a sua importância e influência no comportamento do betão [13].

Adições

A adição é definida como um material a aplicar no betão pela norma NP EN 206-1: 2007, com o intuito de melhorar determinadas propriedades do betão ou conseguir desenvolver outras propriedades [11]. Para a produção do betão são considerados dois tipos de adições, inorgânicos ou quase inertes (adição tipo I) e adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (adição do tipo II) [11].

As adições de tipo I incluem-se os fileres calcários ou pigmentados, enquanto nas adições de tipo II incluem-se as adições pozolânicas que se enquadram nas cinzas volantes, sílicas de fumo, e adições hidráulicas latentes.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas substâncias normalmente usadas como adições na formulação do betão.

Tabela 1 – Características de algumas adições minerais para betão [13].

Tipo	Hidraulicidade	Adição	Composição química e mineralógica	Norma
Tipo I	Quase inertes	Fíler calcário	Maioritariamente carbonato de cálcio ($\geq 90\%$ de CaCO_3)	NP EN 12620:2004
		Pigmentos	-	NP EN 12878:1999
Tipo II	Pozolânicas	Pozolana natural	Silicatos de alumínio vítreos, contendo quartzo, feldspato e mica.	NP 4220:1993
		Cinzas volantes	Maioritariamente silicatos vítreos contendo alumínio, ferro e alcalis (Na_2O , K_2O). Pequenas quantidades de minerais de SiO_2 , aluminato tricálcico, CaO livre.	NP EN 450:2005
		Sílica de fumo	Sílica pura (SiO_2) em estado vítreo.	NP EN 13263:2007p
	Hidráulicas latentes	Escórias de alto-forno	Silicatos vítreos de cálcio, magnésio, alumínio e silício.	NP EN 15167:2008

Agregados

Os agregados podem ser classificados em 3 tipos: naturais, artificiais ou reciclados (resultantes de matérias já usadas anteriormente). No entanto podem ser também classificados pela massa volumétrica, ou seja, agregados leves, agregados normais, agregados densos (Figura 7).



Figura 7 – Agregado britado comum usado na execução de estruturas de betão [14].

A geometria e dimensão dos agregados tem influência sobre muitas das propriedades do betão, principalmente em fresco, tais como a consistência, ângulos de atrito interno, ou sofrer influência da quantidade água na argamassa.

Os agregados naturais são aqueles que apenas sofreram um processo mecânico de seleção tais como:

- Areias;
- Godos;
- Britas.

No caso dos agregados artificiais, como são de origem mineral, resultam de um processo industrial que implica alteração térmica, tais como:

- Xistos;
- Argilas expandidas.

Já no caso dos agregados reciclados, são resultado de um processamento de matéria inorgânica já usada na construção que podem voltar a entrar no ciclo da produção, tais como:

- Resíduos de construção;
- Betão triturado.

Os agregados mais adequados para o betão em termos de consistência deveram ser os provenientes de rochas com tensões de rotura à compressão superior a 60-70 MPa, todavia, quando se é pretendido betão de resistência á compressão muito elevada, tem de se recorrer a agregados com capacidade de resistir a tensões de rotura muito superior aos 70 MPa. No entanto, existem condicionalismos entre a ligação do ligante e o agregado, relacionados com as propriedades químicas deste, nomeadamente propriedades relativamente à origem da rocha dos agregados. Os calcários, dolomites, quartzo, calcites e ortoses são um tipo de rocha recomendado para a produção de betão, uma vez que conseguem estabelecer ligações químicas com os componentes hidratados do cimento [11].

Água

Na produção do betão, a água tem um papel preponderante tanto no estado fresco da massa como na fase de endurecimento. A água permite a mistura dos vários componentes e confere ao betão a trabalhabilidade adequada para permitir uma boa aplicação e compactação; na fase de endurecimento confere reações juntamente com o cimento que irão adicionar resistência ao betão.

Contudo, a água a ser utilizada no fabrico de betão tem de ser em quantidade adequada, porque quando aplicada em excesso, evapora-se, originando uma vasta rede de poros capilares após o endurecimento que irão prejudicar a resistência e durabilidade do betão. A água também terá de estar limpa de impurezas para não contaminar o betão e deve ser usada em quantidades que ajudem apenas a trabalhar a massa [15].

Adjuvantes

Os adjuvantes são materiais que são adicionados à mistura do betão em pequenas quantidades, enquanto este se prepara, com a função de modificar algumas das propriedades do betão quer no estado fresco quer no processo de endurecimento, devendo ser usado o adjuvante adequado à propriedade que se deseja [16]. Este tipo de material é hoje em dia usado frequentemente, pois só assim se consegue betão com as propriedades necessárias para a construção atual, muito embora não se conheçam as propriedades químicas, pois este material é objeto de segredo industrial e apenas se conhecem os efeitos sobre o betão, tais como:

- Diminuir a permeabilidade à água;
- Acelerar ou retardar o endurecimento;
- Inibir ou diminuir a corrosão das armaduras;
- Acelerar ou retardar o processo de presa;
- Aumentar a trabalhabilidade, mantendo ou reduzindo a água;
- Reduzir a água com o objetivo de aumentar a resistência;
- Reduzir a absorção capilar do betão endurecido;
- Compensar a retração;
- Modificar a viscosidade;

No entanto, o uso dos adjuvantes de forma descontrolada pode provocar efeitos negativos ao betão tais como:

- Redução da resistência à compressão;
- Introdução de ar em quantidades exageradas;
- Redução da durabilidade (introdução de cloretos);
- Despassivação das armaduras.

2.3 Betão de elevado desempenho

O betão de elevado desempenho é sobretudo utilizado em situações particulares. Recorrendo a materiais de elevada qualidade e com uma composição composta por métodos que permitem otimizar a capacidade de mistura, o betão de alto desempenho é produzido, transportado para obra, compactado e curado com alto rigor de forma a atingir altos níveis de qualidade.

Este tipo de betão é produzido com uma relação água-ligante muito reduzida, ao contrário de outros betões, mas consegue aplicabilidade em obra igual a betões convencionais graças ao uso de superplastificantes. O betão de elevado desempenho é dotado de uma resistência mecânica (resistência á compressão) superior à de betões convencionais. Contudo a resistência mecânica não é a única propriedade que caracteriza este tipo de betão. Pode-se designar de betão de elevado desempenho, um betão convencional que apresente características de elevada durabilidade e reduzida permeabilidade, uma vez que estas propriedades são consideradas como propriedades de alto desempenho no betão.

O facto dos componentes do betão de elevado desempenho não diferirem do betão convencional, faz deste um grande sucesso, pois apenas usa superplastificantes e nalgumas situações adições ativas, mantendo assim os processos e equipamentos usados nos betões convencionais. Os superplastificantes permitiram a produção de betão de elevado desempenho com proporções de água/ligantes bastante reduzidas com o intuito de conseguir elevada resistência mecânica, no entanto esta conjuntura permitiu também alcançar significativas melhorias noutras propriedades. Assim foi possível produzir betão com elevada fluidez, elevados valores de módulo elasticidade, resistência á flexão, á tração, á abrasão com reduzida permeabilidade e melhor durabilidade.

A primeira vez que foi empregue a designação de betão de elevado desempenho foi em 1990 para classificar a composição de betões que possuíam as características de elevada trabalhabilidade, elevada resistência e elevada durabilidade.

O grande objetivo do betão de elevado desempenho visava a melhoria da durabilidade do betão, no sentido de reduzir custos de manutenção, reparação e substituição ao longo do tempo.

Anteriormente, as especificações requeridas a um betão eram uma determinada resistência à compressão. Hoje em dia é fundamental que as especificações do betão sejam simultaneamente mecânicas, necessárias a uma determinada durabilidade, redução da retração em secagem e baixa permeabilidade, de modo a reduzir a fissuração [17].

2.3.1 Materiais, dosagens e características

A seleção de materiais é uma etapa muito importante na produção de betão de elevado desempenho, dado que estes têm enorme influência no resultado final. Para a produção de betão de elevado desempenho são geralmente usadas como matérias-primas o cimento, agregados finos e grossos, adições minerais, superplastificantes e água, o que não difere muito das matérias aplicados nos betões convencionais.

Por norma, à produção de betão de elevado desempenho é aplicado cimento da classe 42,5 ou 52,5 em quantidades elevadas na ordem dos 400 a 500 kg/m³, apesar destes valores poderem ser ultrapassados, consoante a finalidade da aplicação [17].

Já os agregados assumem uma maior importância nos betões de elevado desempenho, comparado com os betões convencionais. O fissuramento no betão convencional desenvolve-se na pasta ligante e interface do agregado/pasta; no betão de elevado desempenho, o fissuramento acontece devido ao fortalecimento da pasta do betão e a superfície de fratura penetra nos agregados, mobilizando a resistência do betão, dado que a capacidade de carga dos agregados e da pasta é aproximadamente igual a outros betões convencionais. Desta forma, os agregados para betão de elevado desempenho têm de ser selecionados criteriosamente e isentos de películas aderentes e ter uma rigidez e resistência à compressão superior a 150 MPa devido às inúmeras concentrações de tensões. Os agregados mais apropriados devem apresentar uma forma cúbica, e são de

evitar agregados com formas alongadas e lamelares. Devem ser isentos de sílica reativa para evitar a reação alcalis/sílica, que é o mais preocupante neste tipo de betões devido à elevada quantidade de cimento com que são produzidos.

As areias devem ser um pouco mais grossas para aumentar a capacidade de mistura uma vez que este tipo de betão já contém grandes quantidades de partículas finas. Apensar do betão de elevado desempenho poder ser produzido apenas com o cimento como material ligante, poderá ser substituído parcialmente até três combinações minerais, quando o custo destas combinações se torna competitivo em termos de custo, uma vez que acaba por ser vantajoso nalgumas situações em termos de resistência e durabilidade [17].

No caso das adições usadas na produção de betão de elevado desempenho são por vezes originados subprodutos industriais que não foram utilizados ou poderão ficar acumulados em depósitos, e que serão de certa forma um problema para o meio ambiente, com enormes riscos de poluição dos solos, água e ar. A aplicação destas adições no betão, para além das vantagens para o produto em si, acaba por ser vantajoso do ponto de vista económico-social, quer na proteção ambiental quer na conservação dos recursos naturais.

As adições usadas na produção de betão de elevado desempenho para substituição parcial do cimento são as cinzas volantes, escória granulada, sílica de fumo, metacaulino e cinzas de casca de arroz. Contudo, são sem dúvida as cinzas volantes e as sílicas de fumo as usadas com maior frequência. Contudo, apesar de não ser obrigatória a adição de sílica de fumo na produção de betão de elevado desempenho, é praticamente indispensável a aplicação em betões com resistência à compressão superior a 100 MPa, se bem que o preço da sílica de fumo possa ser um fator inibidor, uma vez que custa cerca de 10 vezes mais que o cimento [18]. A quantidade de ligante na produção de betão de elevado desempenho, pode oscilar entre os 400/500 kg/m³, podendo mesmo nalguns casos ultrapassar os 600 kg/m³. A dosagem mais correta é cerca de 20 a 25% da massa do cimento. Contudo uma dosagem de 10% de sílica de fumo pode ser considerada ótima tendo em conta a redução de custo e que as características do betão pouco diferem no seu comportamento [18]. Já os valores de superplastificantes devem andar na ordem dos 3 a 10 L/m³, o que corresponde a uma dosagem na ordem dos 0,5 a 3,0% dos componentes secos e uma

percentagem de 1,0 a 2,0% de massa ligante [18]. A água a adicionar ao composto deverá ser sempre na menor percentagem possível, de modo a corresponder aos requisitos necessários à mistura em fresco. Também com a aplicação de adjuvantes redutores de água de alta gama é possível colocar em obra betão com relação entre água e ligante inferior a 0,3%, conseguindo assim minimizar a quantidade de água a juntar à amassadura, uma vez que os superplastificantes conseguem controlar as características reológicas do conjunto, sendo assim possível maximizar os parâmetros de durabilidade. A adição de cinzas volantes pode contribuir também para a redução da relação de água/ligantes.

O betão de elevado desempenho em obra, de uma forma sucinta, caracteriza-se pelas seguintes características:

- Maior durabilidade: a baixa permeabilidade e elevada resistência à penetração de agentes agressivos são fatores que aumentam a durabilidade, e este é sem dúvida um fator importante;
- Resistência à compressão e módulo de elasticidade: os betões de elevado desempenho têm uma elevada resistência à compressão, características fundamentais para a construção de pilares ou vigas de dimensões mais reduzidas, o que leva de certa forma a uma eficiência económica. No caso do módulo de elasticidade, o betão de elevado desempenho apresenta valor muito acima de qualquer betão convencional, permitindo um aumento de rigidez, o que o torna um ótimo material para a construção de edifícios altos que estejam sujeitos a ventos fortes ou sismos;
- Perda de trabalhabilidade: um dos problemas que pode afetar este tipo de betão é a rápida secagem, devido à percentagem de água bastante baixa e a grande dosagem de cimento. Com temperaturas elevadas os tempos de hidratação são menores e esse fator afeta a trabalhabilidade em obra. No entanto, este problema é resolvido com o uso de retardadores;
- Elevada resistência em idades iniciais: este tipo de betão consegue ao fim de 4 horas após a aplicação em obra, atingir uma resistência à compressão na ordem dos 25 MPa, permitindo assim um aumento de ritmo e rendimento em obra [19] ;

- Cura: uma vez que existe uma presença elevada de cimento e baixa quantidade de água, o processo de cura tem de ser cuidado, pois podem ocorrer fissuração por retração plástica e autogenia.

2.3.2 Aplicações

O betão de elevado desempenho, devido à sua elevada resistência, aplicação é fundamentalmente aplicado em elementos verticais, pilares e paredes. Outros campos de aplicação podem ser estruturas sujeitas a ambientes particularmente agressivos como é o caso de determinadas obras, como pontes. A elevada durabilidade do betão de elevado desempenho torna este material bastante solicitado, uma vez que apresenta uma vida útil de cerca de pelo menos 100 anos.



Figura 8 – *Two Union Square*, Seattle, EUA[19].

A construção do edifício Two Union Square (Figura 8) decorreu entre 1988 e 89, situa-se em Seattle, nos EUA, mede 216 m de altura, e tem 58 pisos. Foi a primeira aplicação de betão em edifícios altos. O betão de elevado desempenho apresentou uma elevada resistência à compressão, nomeadamente. 91MPa ao fim de 2 dias, 119 MPa ao fim de 28 dias e 145 MPa ao fim de 145 dias. Já o

módulo de elasticidade em compressão chegou aos 50 GPa. A composição deste betão contou com uma dosagem de 513 kg/m^3 de cimento, 43 kg/m^3 de sílica de fumo e uma relação água ligante na ordem dos 0,22%.



Figura 9 – *Petronas Towers*, Kuala-Lumpur, Malásia [19].

Já as Petronas Towers (Figura 9) têm cerca de 452 m de altura, correspondente a 88 pisos, sendo um dos edifícios mais altos do mundo. O betão de elevado desempenho foi produzido com uma dosagem de 260 kg/m^3 de cimento Portland, 260 kg/m^3 de cimento composto (continha 50 kg/m^3 de cinzas volantes) e cerca de 30 kg/m^3 de sílica de fumo e uma relação de água ligante na ordem de 0,27%. Ao fim de 28 dias já apresentava elevados valores de resistência à compressão na ordem dos 100 MPa e um módulo de elasticidade de 36 GPa com 56 dias [19].



Figura 10 – *Ponte Vasco da Gama*, Lisboa [19].

Em Portugal, também já existem algumas obras que recorreram ao betão de elevado desempenho, como é o caso da Ponte Vasco da Gama (Figura 10) e o Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança no porto de Lisboa (Figura 11). Com 17,2 km de comprimento, e com o vão principal de 420 metros, a Ponte Vasco da Gama foi concluída em 1998. Foi a primeira obra em Portugal em betão de elevado desempenho, satisfazendo elevados padrões de qualidade, conseguindo assim uma vida útil de cerca de 120 anos sem necessidade de intervenções de manutenção e reparação de grande vulto. Ao 28º dia já apresentava uma resistência à compressão média entre 62 MPa e 77 MPa. A composição deste betão de elevado desempenho contou com 360 kg/m³ de cimento, 20% de cinzas volantes e uma relação de água e ligantes na ordem dos 0,34%.



Figura 11 – Edifício do “Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança” do porto de Lisboa [19].

No caso do Edifício do “Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança” do Porto de Lisboa, que se encontra localizado num ambiente

marítimo, considerado particularmente agressivo, sujeito à ação de cloretos, foi estabelecido como período de vida útil 50 anos. Nesse sentido, o betão de elevado desempenho aplicado continha na sua composição sílica de fumo com cerca de 350 a 400 kg/m³ de cimento, entre 15 a 30 kg/m³ de sílica de fumo e uma relação entre água e ligantes na ordem dos 0,4%. Este betão tinha de obedecer a requisitos de desempenho em valores limite a determinados ensaios, como o de penetração de água, absorção de água por capilaridade, resistência à penetração de cloretos e porosidade. Com a composição descrita conseguiram-se valores de resistência à compressão na ordem dos 89 MPa.

2.4 Betão à base de fibras

O betão simples sem armação é um material frágil com baixa tenacidade e baixa resistência à tração. Assim, a adição de fibras tem um papel fundamental na estrutura do betão de forma a atravessar as fissuras que podem formar no betão quando este está sob a influência de cargas externas ou sujeito a mudanças bruscas de temperatura, ou até mesmo face à humidade existente.

O betão reforçado por fibras é constituído por cimento Portland, agregados e por fibras descontínuas misturadas. Esta é uma tecnologia que vem sendo aplicada desde os meados dos anos 60, quase como uma cura para a maioria dos problemas a que o betão está sujeito. No entanto, o betão reforçado com fibras não está livre de fissurações, se bem que possua propriedades que aumentam a resistência á fissuração.

O tipo de fibras usadas no betão são as fibras de aço, polipropileno, carbono, vidro, nylon, celulose, acrílico, polietileno, madeira e sisal, contudo, na maioria dos casos são usadas somente as fibras de aço e polipropileno.

A maioria das aplicações desta técnica está ligada sobretudo à execução de lajes, betão projetado e pré-esforçados (modulação). Nalguns casos as fibras têm módulos de elasticidade superiores aos do próprio betão e noutros casos inferiores. As fibras permitem aumentar a capacidade de ductilidade do betão após a fissuração, que caso tenham sido aplicadas em quantidades suficientes, e

bem impregnadas na matriz, permitem que a fissura apesar de aberta, o betão tenha capacidade de resistir a tensões mais elevadas e com uma capacidade de deformação no estágio pro-fissuração, mais propriamente designado por “strain softening”. Apesar de esta técnica permitir determinadas características no comportamento do betão, este não será o único caminho a ter em conta, uma vez que o custo das fibras é ainda um pouco avultado e para se ter resultados significativos a quantidade de fibras terá de ser sempre superior a 1% do volume e neste caso, podemos ter outras soluções mais económicas como o betão armado ou seguir outros procedimentos de cura [20].

2.4.1 Tipos de fibras disponíveis

Existem vários tipos de fibras disponíveis no mercado que podem ser usadas como material de reforço. As características de cada tipo de fibra variam entre si, quer na composição química ou física, quer nas propriedades mecânicas [20].

As fibras aplicadas ao betão podem ser divididas em quatro grupos: fibras naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

Fibras Naturais

As primeiras fibras a serem aplicadas foram de origem natural, como por exemplo de bambu, sisal ou celulose. Algumas destas fibras conseguem atingir grandes resistências como no caso das fibras de bambu, que podem superar 100 MPa e módulo de elasticidade compreendido entre 10 a 25 GPa.

Contudo, a durabilidade de compósitos formados por fibras vegetais constitui um problema devido à degradação provocada por microrganismos, tal como a sua exposição a ambientes alcalinos, que provocam rápida deterioração [20].

Fibras Poliméricas

Os polímeros apresentam uma estrutura química que permite comportamentos diferentes, dando origem a diferentes tipos de fibras poliméricas, cuja aplicação no betão é bastante promissor. Este tipo de fibra para reforço de betão remonta à década de 60. Dos diferentes tipos de fibras que fazem parte deste grupo podem-se destacar as fibras de polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida (nylon).

As fibras de polipropileno conseguem adquirir uma consistência plástica com o aumento da temperatura. Este material é caracterizado por possuir uma grande flexibilidade e tenacidade consoante a sua constituição.

O reforço por via de fibras de polipropileno tem a vantagem de controlar a fissuração, causada pela mudança de volumes a matriz do betão, muito comum em países quentes. O controlo da fissuração é obtido através da diminuição da retração ou dos efeitos da retração. Em termos de comportamento mecânico, as fibras de polipropileno apresentam um módulo de elasticidade na ordem dos 8 GPa, sendo portanto comparado com fibras de outra natureza de baixo módulo elasticidade, no entanto, em resistência à tração apresentam aproximadamente valores na ordem dos 400 MPa e elevada resistência ao ataque de substâncias químicas. Tanto na Europa como nos Estados Unidos, é comum a aplicação de compósitos reforçados com fibras de polipropileno, principalmente em pavimentos, onde estas fibras de baixa percentagem do volume, cerca de 0,1% e permitem substituir placas metálicas destinadas apenas ao controlo da fissuração por retração. Em termos de custo e tempo de aplicação o betão com fibras de polipropileno é vantajoso [21].

As fibras de polietileno apresentam características semelhantes às fibras de polipropileno, no entanto a durabilidade destas fibras é mais elevada apesar de apresentarem maior deformação por fluência, o que limita a sua utilização em compósitos fibrosos fissurados submetidos a tensões elevadas constantes. O polietileno de alta densidade foi desenvolvido para minimizar a baixa aderência com a matriz e aumentar o módulo de elasticidade.

O poliéster é um polímero que apresenta valores elevados de densidade, rigidez e resistência, conferindo estas propriedades às respetivas fibras. Tal como as fibras de polipropileno, estas são usadas para as mesmas finalidades, embora o

poliéster mais comum seja o polietileno tereftalato (PET), usado para produção de garrafas de plástico.

A poliamida é um polímero que contém largas cadeias de moléculas em forma de espiral, que possuem características de baixa resistência e rigidez durante o processo de produção, mas com o reforço destas moléculas, aumenta resistência e o módulo de elasticidade, como por exemplo no caso das fibras tipo kevlar. As mais relevantes são a fibras kevlar 29 que apresentam uma resistência à tração na ordem dos 3 GPa e módulo elasticidade próximo dos 64 GPa e as kevlar 49 que apresenta a mesma resistência mecânica e um módulo de elasticidade mais elevado, na ordem dos 300 GPa [21].

Fibras Minerais

A família das fibras minerais é composta por fibras de carbono, vidro e amianto. As fibras de carbono são materiais cujas propriedades são função da resistência das ligações entre os átomos de carbono e do peso atômico reduzido dos mesmos. Estas fibras têm diâmetros que variam entre os 5 e os 10 μm e são constituídas por grupos que chegam aos 20 mil filamentos. Ainda assim estas fibras podem ser divididas por duas categorias, fibras de alta resistência e fibras de alta rigidez. As fibras de alta resistência têm uma resistência à tração de aproximadamente 2,4 GPa enquanto o módulo de elasticidade é de 240 GPa. Já as fibras de alta rigidez apresentam resistência à tração da ordem de 2,1 GPa e módulo de elasticidade de 420 GPa [22]. As fibras de vidro são normalmente produzidas em forma de anel, ou seja, os fios são compostos de centenas de filamentos individuais e justapostos. Estes filamentos individuais chegam a ter um diâmetro de cerca de 10 μm . Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir de um tipo de vidro que é suscetível ao ataque dos álcalis presentes no cimento Portland. Este material ainda está em fase de desenvolvimento, no sentido de encontrar uma fibra que permita ser resistente ao ataque de bases. As fibras de amianto apresentam excelentes características mecânicas, comparadas com as restantes fibras, com resistência à tração na ordem de 1 GPa e módulos de elasticidade de 160 GPa. Para além disso, combinam bem com a matriz de

cimento. No entanto, a utilização na construção civil está proibida nalguns países por esta fibra libertar pequenas partículas que danificam os alvéolos pulmonares quando inspiradas pelo Homem. Apresentam também características de baixa resistência à carga e ao impacto, o que acaba por limitar a aplicação deste material na engenharia civil.

Fibras Metálicas

Das fibras metálicas, a mais comum é a fibra de aço. O formato desta fibra é variável, o que permite assim, uma melhor aderência à matriz do cimento. Tem sido uma fibra que tem sido alvo de estudo no sentido de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de construção. A resistência à tração das fibras metálicas é de cerca de 1,1 GPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa [20].

Geralmente, a rutura de um compósito de fibras metálicas é associado ao arrancamento das fibras e não ao rompimento. Dependendo do meio onde se inserem, estas fibras podem apresentar problemas de corrosão. No entanto, foi desenvolvida uma técnica para minimizar este problema, que é o banho de níquel. O betão reforçado com fibras de aço (Figura 12) é muito usado na aplicação de pavimentos e restauração de pontes. O sucesso deste tipo de fibra deve-se à grande capacidade de resistência á tenacidade.

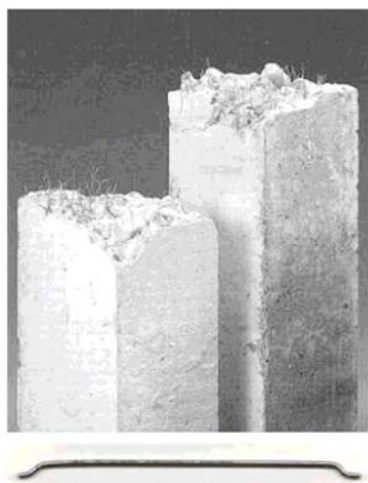


Figura 12 – Prismas de betão reforçados com fibras de aço [23].

A eficiência das fibras de aço no aumento da tenacidade do compósito depende da interligação com a matriz, desde que permita grandes transferências de tensões entre a matriz e as fibras [24]. Existem dois mecanismos básicos de transferência de tensões: mecanismo elástico e de atrito. O mecanismo elástico é dominado enquanto as tensões de fratura na ligação da fibra-matriz não superam a resistência de fratura, ou seja não existe deslocamento, o que normalmente ocorre na pré-fissuração do compósito. Já o mecanismo de atrito é predominante na pós-fissuração, que funciona como ponte de tensões através da fissura (Figura 13).

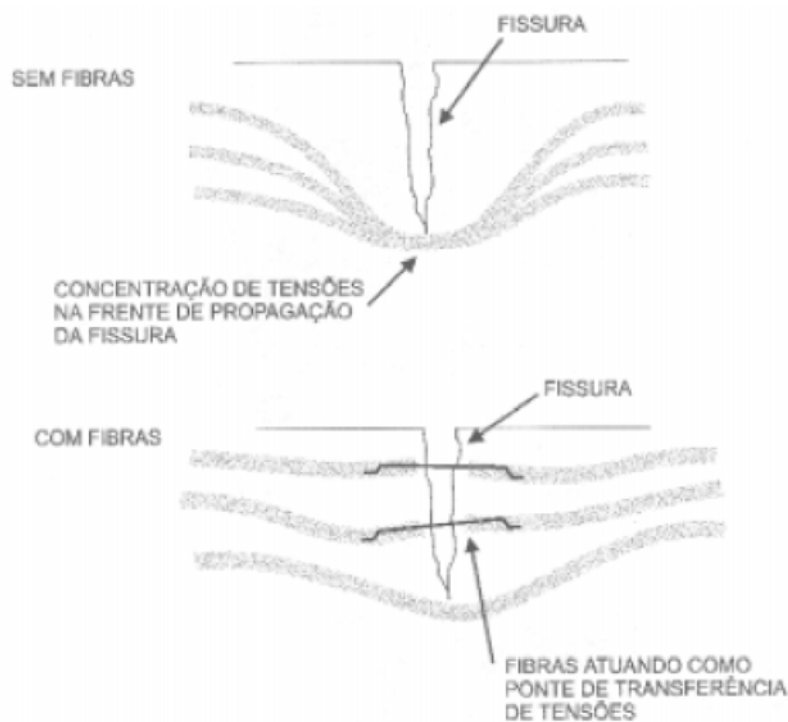


Figura 13 - Mecanismo de reforço de fibra atuando como ponte de transferência de tensões [23].

Em qualquer compósito a tenacidade é maior se a aderência da fibra matriz for melhorada ou se existir um número elevado de fibras por metro cubico de matriz, que provavelmente consiga intercepar uma fissura e funcionar como ponte de tensão.

2.4.2 Aplicações

O betão reforçado com fibras pode ser aplicado em diversos tipos de obras, destacando-se principalmente o reforço de fundações, reforços de pavimentos e em forma de betão projetado para o revestimento de túneis (Figura 14), ou até em mobiliário urbano (Figura 15).



Figura 14 – Segmentos de tuneis em betão reforçado com fibras de aço [25].



Figura 15 – Mobiliário urbano em betão reforçado com fibras de vidro [26].

2.5 Betão polimérico

A construção civil é uma indústria consumidora de matérias-primas naturais, que recorre a uma percentagem de recursos naturais na ordem dos 20 a 50%. As matérias-primas principais desta indústria são o cimento de Portland, as areias e as britas. Neste contexto, o betão de Portland tem sido ao longo dos anos o material de construção apropriado para utilização em estruturas, essencialmente devido ao baixo custo e comportamento adequado às necessidades da construção, facilidade de colocação em obra, modelagem e esteticamente interessante. Contudo, apesar desta versatilidade, é também necessário responder às exigências de conforto, economia, durabilidade, e aperfeiçoamento das características técnicas, relativamente ao desempenho. O betão convencional tem vindo a ser alvo de estudo de forma a superar o desempenho mecânico e durabilidade permitindo novas formas estruturais na construção até então, só ao alcance do ferro.

Assim, a evolução dos componentes agregados do betão, como é o caso das resinas poliméricas em matriz de cimento, abriram um novo caminho da aplicação do betão da construção civil. Os estudos desenvolvidos até então permitiram que esta matéria-prima pudesse ser usada, através de impregnação da resina, em elementos de betão adicionado à mistura dos agregados, funcionando como aglomerante ou como agente modificador do betão [27].

O betão polimérico é um material de constituição compósita, que resulta duma mistura de uma resina polimérica com um agregado mineral. Neste tipo de betão, a resina polimérica substitui o ligante água/cimento do betão convencional ou matriz do compósito, ou seja, a matriz dos compostos poliméricos é formada por uma resina sintética que é polimerizada como aditivos. Assim, os tipos de resinas frequentemente utilizadas como aglomerantes na produção de betão polimérico são geralmente monómeros catalisados do tipo epóxi, acrílicos, poliuretanos ou poliésteres. No entanto, na construção civil, o maior desenvolvimento tecnológico dos betões poliméricos são à base de resinas epóxi e poliésteres. O betão polimérico, em comparação com o betão convencional, apresenta vantagens,

como por exemplo, elevada resistência mecânica, melhor resistência química e baixa permeabilidade, alta capacidade de amortecimento a vibração e boa durabilidade das estruturas que sofrem processos de congelamento e descongelamento (Tabela 2). Para além das propriedades focadas, este tipo de betão reduz a necessidade de manutenção, para além do rápido tempo de cura também ser considerado como uma grande vantagem na produção de pré-fabricados, uma vez que as peças podem ser desmoldadas em poucas horas. Quando este tipo de betão se destina a reparações, a estrutura pode ser pronta de um dia para o outro, uma vez que estudos comprovam que as argamassas poliméricas adquirem 90% da resistência final num dia de cura [28].

Tabela 2 – Comparação das propriedades do betão polimérico e convencional [29].

Composto	Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Flexão (MPa)
Betão polimérico	0,4	120	12	22
Betão convencional	5,5	35	24,5	2,5

O betão polimérico define-se como um material produzido com agregados finos, com propriedades mecânicas derivadas da composição de resina com areia natural ou pó de brita, que tem vindo a ser estudado desde o século passado.

Hoje em dia tem-se assistido a um crescimento na aplicação do betão polimérico, principalmente na pré-fabricação na Europa. Podemos encontrar como exemplos mais comuns produtos como drenos para águas, caixas, tubagens ou postos de transmissão, bem como painéis de fachadas ou revestimentos para a indústria química e alimentar. Contudo, por se tratar de um material com capacidade de reproduzir determinados acabamentos nas suas formas, incluindo texturas, o uso de cores através dos pigmentos, este material chega até ser utilizado diretamente em painéis e fachadas de uso comercial.

Já nos Estados Unidos, o betão polimérico é utilizado frequentemente em pavimentos, pontes e indústrias petroquímicas. No caso de outros países

desenvolvidos, como o Canadá e o Japão, o betão polimérico é aplicado em construções subterrâneas e em pavimentos. No entanto o número de aplicações de materiais compósitos é cada vez maior. Para isso contribui muito o comportamento mecânico deste material em ambientes corrosivos e sob solicitações de fadiga, as elevadas resistência e rigidez e o peso reduzido que acabam por ser as principais causas da crescente procura de compósitos em várias áreas da engenharia. O betão polimérico ainda tem uma limitação que é o elevado custo da resina. Assim, é necessário estabelecer um compromisso entre a composição e a otimização do material de forma a minimizar esta limitação e aumentar o leque de aplicações.

Na composição do betão polimérico tem-se em consideração a trabalhabilidade, resistência mecânica e custo de produção, aplicação em obra e para além destas variáveis, a composição do betão polimérico deve corresponder a determinadas características químicas e físicas pretendidas que os agregados, aglomerantes e fibras de reforço permitem obter. Por norma, o betão polimérico é um material heterogéneo, característica adquirida pelo aglomerante polimérico.

2.5.1 Constituição do Betão Polimérico

A constituição do betão polimérico é feita por um polímero de ligação (matriz) e por um agregado mineral (agregado), e nalgumas situações, pode até haver a necessidade de introduzir materiais de reforço (armação em metal ou tela de fibra), contudo os processos de fabricação ou constituintes do betão polimérico resultam em função das suas aplicações [29]. As principais aplicações deste material são para efeitos de reparação doutros betões ou para argamassas de construção (Tabela 3). O betão polimérico acrescenta determinadas vantagens em termos de qualidade a um determinado produto, como por exemplo:

- Elevada estabilidade dimensional;
- Rápida fixação;
- Elevada resistência estática e dinâmica;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;

- Excelentes propriedades mecânicas;
- Excelente durabilidade;
- Resistência à corrosão;
- Custo razoável.

Tabela 3 - Aplicações e vantagens do concreto polimérico [29].

Aplicações	Vantagens
Sobreposições	Rápida configuração, fácil colocação.
Decks de pontes e pavimentos	Resistência à corrosão.
Reparações	Configuração rápida, boa aderência às superfícies.
Pisos de betão, reparações de estruturas.	Impermeável à água e sais de degelo.
Produtos pré-moldados	Curto tempo de cura, alta resistência ao peso médio.
Aplicações em ferramentas de máquinas	Moldado (no lugar), baixo custo, dinâmica e estabilidade térmica.
Aplicações especiais	Alta resistência, baixa emissão de resina

De uma forma geral, o desempenho do betão polimérico está ligado ao tipo de resina utilizada na sua produção, dado que este material é o grande responsável pelo comportamento mecânico do betão. Contudo, no que confere ao módulo de elasticidade, são os agregados que permitem os bons valores e sobretudo a matéria que permite melhor viabilidade comercial devido ao elevado custo das resinas [28].

A tabela 4 apresenta algumas propriedades dos betões poliméricos, constituídos por aglomerantes epóxis e poliéster, comparado também com o betão tradicional, onde se pode observar que o betão polimérico apresenta características ideais para aplicações onde seja solicitado um elevado desempenho e grande durabilidade

Tabela 4 – Propriedade dos betões [29].

Aglomerante	Absorção (Kg/dm ³)	Resistência à compressão (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à Flexão (Mpa)
Betão P. de Epóxi	0,02 – 1,0	50 - 150	20 - 40	15 - 50
Betão P. de Poliéster	0,3 – 1,0	50 - 150	20 - 40	15 - 45
Betão convencional Portland	5 - 8	13 - 35	20 - 30	2 - 8

2.5.2 Matriz Polimérica

O betão de base polimérica é composto por uma resina termoendurecível, um material compósito de ligas inertes e naturais dos quais se destaca a areia de sílica. A esta resina, antes da mistura com os inertes orgânicos, é adicionado os catalisadores e aceleradores para iniciar a reação de cura, a chamada polimerização. O betão composto com estas resinas poliméricas tem como vantagens, comparado com os betões de cimento, a elevada resistência, melhor resistência química, boa resistência à corrosão, elevada duração, grande taxa de impermeabilidade e processos de cura muito reduzidos; como desvantagens, o alto índice de retração na cura e o facto de necessitarem de ser flexibilizadas.

A produção de betão polimérico implica que seja feita uma mistura de um monómero ou um pré-polímero, com catalisador, endurecedor ou com outros elementos de agregados finos. Pode-se no entanto ainda acrescentar outros elementos à mistura como plastificantes ou retardantes ao fogo. É também usual aplicar-se agentes ligantes de silano para aumentar algumas propriedades do interface, como por exemplo, a resistência da ligação entre a matriz polimérica e o agregado [30]. Existem também situações que há necessidade de reforçar o betão polimérico com fibras, principalmente em aplicações estruturais explorando totalmente o potencial do produto obtido. Podem ser adicionadas fibras de carbono, fibras metálicas, fibras de vidro ou até mantas ou entranhados à base de fibras de vidro [30].

Os tipos de resinas usados normalmente como aglomerantes na produção de betão polimérico são:

- Resinas epóxi;
- Resina poliéster;
- Acrílicos;
- Poliuretanos.

No entanto, as resinas mais utilizadas em betão de matriz polimérica são as resinas epóxi e poliéster. Neste caso, importa destacar as resinas epóxi, uma vez que é este o material aplicado no trabalho experimental.

A resina epóxi é um tipo de material também aplicado na engenharia civil. Este tipo de material começou por ser utilizado como adesivo devido às boas propriedades térmicas e mecânicas, pelo que é aplicado na construção civil em revestimentos, reforços e reparações. As resinas epóxi têm como principal desvantagem o elevado custo.

Estas resinas são resultado de uma reação química entre o bisfenol e a epicloridrina. A variação de diferentes proporções destes componentes produz diferentes níveis de polimerização da molécula de baixa viscosidade líquida num ponto de fusão elevado.

Assim, as resinas líquidas utilizadas na produção de betão polimérico são fundamentalmente caracterizadas de acordo com as seguintes características:

- Viscosidade;
- Índice de hidróxido;
- Peso molecular medio;
- Distorção térmica.

A estrutura tridimensional cruzada das resinas epóxi é obtida através de hidrogénicos epoxídicos ativos nos componentes endurecedores, que permitem à resina epóxi ter excelentes propriedades, uma vez que algumas resinas epóxi estão ligadas entre si através de um agente de cura.

É também possível alterar as características da resina epóxi, através do uso de diferentes endurecedores, ou de variadas combinações de endurecedores, dando lugar a um vasto leque de produtos para diferentes aplicações. É possível o uso deste material em varias aplicações, particularmente na obtenção de compósitos

para a construção civil, não só pelas propriedades mecânicas e térmicas como também pela resistência elétrica, grande capacidade de adesivagem, elevada rigidez, resistência a ambientes agressivos, derivado á capacidade de cura instantânea aliada ainda à possibilidade de cura em ambientes húmidos [29].

Contudo, este tipo de resinas para além do custo elevado como anteriormente referido, e tal como a maioria dos materiais poliméricos, apresentam uma sensibilidade a elevadas temperaturas e uma baixa resistência á fratura. É um dos mais importantes polímeros termofixos para aplicações estruturais ou como adesivo derivado ao elevado módulo de elasticidade, ao fácil processamento, à excelente resistência química e térmica e à fácil interligação com outros materiais.

2.5.3 Agregados

Tal como noutros betões, na produção são utilizados agregados, para além do polímero de ligação ou matriz polimérica. Os agregados são exatamente os mesmos, apenas com uma diferença, que é o controlo de qualidade para garantir que não há a presença de humidades, que são utilizados limpos e sem qualquer impureza de argilas ou barro. Tal como no betão de elevado desempenho, o betão polimérico admite na sua produção a utilização de resíduos sólidos inertes ou até resíduos industriais perigosos, através da resina impedindo a libertação de substâncias perigosas, permitindo também assim desta forma solucionar um problema ambiental, uma vez que os resíduos sólidos são geralmente depositados em aterros, o que acaba por provocar alguns problemas ambientais, para além desta matéria-prima alternativa diminuir a extração de recursos naturais como os mármore granitos e areias [30]. Uma vez que este tipo de betão é extremamente caro, é importante obter a máxima compactação possível do agregado.

Os agregados podem-se classificar em dois grupos. O grupo dos agregados finos, mais conhecidos por áreas, que podem ter tamanhos entre os 75 µm a 4,5 mm, e o grupo dos agregados grossos, as chamadas britas, que podem ter tamanho entre os 4,5 mm a 50 mm. Estes agregados são obtidos geralmente por meio de 2

processos, os naturais, através da rega e abrasão, e artificiais (mecânicos), através de esmagamento/ moagem.

Assim, os agregados naturais a partir destes processos são classificados em diferentes tipos:

- As pedras trituradas ou agregados minerais fabricados, cuja camada de rocha triturada é reduzida ao tamanho pretendido e dividido em grupos, como arenitos, granitos calcários e dolomitos;

- Agregados de peso normal, como é o caso de cascalho, areias, brita normal com uma densidade entre os 1520-1680 kg/m³. Este tipo de agregado é o mais usual;

- Agregados leves, que são fabricados ou naturais com uma densidade inferior a 1120 kg/m³. Neste caso, os agregados são rasteados de forma a obterem o tamanho pretendido, podendo até ser triturados para se conseguir as especificações pretendidas.

Já as rochas são classificadas em 3 grupos:

- Agregados minerais naturais, caso do cascalho, areias e britas derivados de matéria natural;

- Rochas fundida, que são formadas pelo arrefecimento da rocha de magma, como os granitos e basaltos, rotulados de agregado furo e forte;

- Rochas metamórficas, conhecidas por rocha sedimentares, como o mármore, xisto, ardósia. São denominados como agregados pobres.

Os agregados sintéticos são obtidos por processos térmicos, a partir de subprodutos de origem industrial, como é o caso das cinzas volantes. Para além destes grupos de agregados, existem outras descrições de agregados que os classifica por: sílica minerais (como por exemplo, quartzo, opala, calcedônia, tridimita), feldspatos, sulfuretos, minerais micosos, minerais carbonite, minerais ferromagnesianos, sulfuretos, óxidos Tron, Minerais Clay e Zeolitas. Assim, com estes grupos e classificações de agregados é fácil conhecer as propriedades dos agregados, apesar destas propriedades dependerem sempre das características químicas, ou composição mineral da rocha mãe.

2.5.4 Mistura

O betão polimérico pode ser produzido por dois métodos. Um deles, é de forma convencional, em que é adicionado resina aos agregados secos previamente misturados até se conseguir uma massa uniforme, apesar de esta técnica poder gerar bolhas de ar e de certa forma penalize as propriedades técnicas do betão polimérico. O segundo método de produção, consiste em colocar a resina no molde e depois gradualmente adicionar os agregados, consolidando a mistura através de vibração mecânica. Esta técnica tem a vantagem de conceber peças mais uniformes e com mínimo de ar. Para além disso, a qualidade do betão polimérico depende sempre da proporção correta dos elementos constituintes, e neste campo a dosagem tem algum peso económico, visto que o custo do produto e da resina depende do custo do aglomerado polimérico.

É importante uma boa mistura entre a resina e os agregados, já que o excesso de resina e a porosidade devida ao ar comprometem as potencialidades deste betão.

2.5.5 Propriedades do betão polimérico

O betão polimérico caracteriza-se pela elevada impermeabilidade aos líquidos e gases, por possuir uma excelente resistência à abrasão química (ácidos, bases e solventes) e uma boa durabilidade, mesmo com ciclos de gelo e degelo, sendo também um bom isolante elétrico. Ainda, possui uma resistência à tração e à flexão cerca de 4 vezes superior à dos betões convencionais, apesar de ter o mesmo módulo de elasticidade. Para além destas propriedades observadas na tabela 5, apresenta um rápido aumento da resistência mecânica, e tem um tempo de endurecimento curto.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas comuns num betão de matriz polimérica [27].

Monômero/polímero	Relação polímero/agregado	Densidade (kg/m ³)	Resist. à compressão (MPa)	Resist. à tração (MPa)	Resist. à flexão (MPa)	Mód. de deformação (GPa)
Poliéster	1:10	2400	117	13	37	32
Poliéster	1:9	2330	69	-	17	28
Poliéster/estireno	1:4	-	82	-	-	-
Epoxi+40%dibutil ftalato	1:1*	1650	50	130	-	2
Epoxi + poliamino-amida	1:9	2280	65	-	23	32
Epóxi-poliamida	1:9	2000	95	-	33	-
Epóxi-furânica	1:1*	1700	65	7	0.1	-
NMA-TMPTMA	1:15	2400	137	10	22	35

No entanto, o betão polimérico apresenta algumas desvantagens como a baixa resistência à oxidação, a elevada deformabilidade, sendo um pouco restritivo em construção, e o custo elevado [29].

Um dos fatores de grande importância no betão polimérico é a resistência à interligação entre o agregado e o ligante. As principais características do betão polimérico dependem deste fator, como é o caso da resistência à flexão e à compressão, para além da permeabilidade, resistência à temperatura e fluência. Para isso, é necessário que o agregado tenha uma área áspera e o ligante polimérico tenha uma grande área de contacto para uma melhor interligação e, conseqüentemente, um betão mais resistente. Portanto é necessário que a superfície do agregado seja limpa e livre de partículas. No entanto, um aspeto fundamental é os agregados estarem secos antes da mistura com a resina para promover uma melhor aderência e maximizar a resistência da resina.

2.5.6 Tipos de betão polimérico

Na produção do betão polimérico é necessário um monómero ou um pré-polímero, um endurecedor e um catalisador para misturar com os agregados. Geralmente são acrescentados também à composição agentes de ligação de

silano com a perspectiva de aumentar a resistência da ligação entre a matriz polimérica e os reforços. Contudo, em determinadas aplicações para aumentar as potencialidades mecânicas do betão polimérico adicionam-se reforços de fibras, tais como fibras de vidro e de carbono ou fibras metálicas.

Da variedade de monómeros e pré-polímeros na produção de betão polimérico, destacam-se quatro. O metacrilato de metila, o poliéster pré-polímero de estireno, o epóxido pré-polímero endurecedor e o álcool furfurílico.

Esta variedade de monómeros e pré-polímeros permite produzir uma variedade de produtos de betão polimérico como as características apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades dos vários tipos de betão polimérico [29].

Tipo de aglomerante	Resistência à Compressão	Resistência à Tração	Resistência à Flexão	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson
Poli (Metacrilato de metila)	70 – 210	9 – 11	30 – 35	35 – 40	0,22 – 0,33
Poliéster	50 – 150	8 – 25	15 – 45	20 – 40	0,3
Epóxi	50 – 150	8 – 25	15 – 50	20 – 40	0,3
Furan Polímero	48 – 68	7 – 8	-	-	-
Betão convencional Portland	13 - 35	1,5 – 3,5	-	20 – 30	0,15 – 0,2

Betão Polimérico Acrílico

O polímero acrílico, mais conhecido por metacrilato de metila, é obtido através da polimerização do metacrilato de metila. Este material permite uma boa versatilidade do betão, pois apresenta boa resistência à intempérie, excelentes propriedades de impermeabilização, uma boa resistência química, uma contração relativamente baixa, entre os 0,01% e os 0,1%, e um coeficiente de expansão térmica equivalente ao do betão de cimento Portland.

Comparativamente com os monômeros ou pré-polímeros aplicados no betão polimérico de poliéster, o metacrilato de metila é mais caro, mas é mais aplicado em painéis de fachadas, sanitários ou estruturas de escadas. Para além disso este material tem vindo a evoluir e tem vindo a ser aplicado como material estrutural na reparação de fissuras em vãos de pontes.

Betão Polimérico Poliéster

O poliéster é dos polímeros mais utilizados derivado ao baixo custo. O betão polimérico de poliéster caracteriza-se por ter uma boa resistência mecânica, aderências a outros materiais bastante boa, tal como boa resistência química.

Apesar de tudo, este betão apresenta uma contração superior dez vezes ao betão convencional, o que consiste numa grande desvantagem. O betão polimérico de poliéster é essencialmente aplicado em pré-moldados.

Betão Polimérico Epóxi

A resina epóxi é um material que, tal como o poliéster atinge a cura, resultante de uma reação química de um vasto leque de opção de agentes de cura. Normalmente os agentes mais usados são os poliaminas, como é o caso das poliaminas terciário. Este endurecedor resulta numa resina epóxi com maior resistência química. Se o pretendido for o aumento de flexibilidade ou de resistência a temperaturas mais elevadas, os agentes selecionados para obter estas características são as poliamidas e os polímeros polissulfeto. Estes agentes também potenciam boas características ao betão, diminuindo o risco de degradação, contudo a resistência a solventes químicos é inferior quando comparando com produtos semelhantes curados com poliaminas. Já a aplicação de polissulfeto incrementa uma maior flexibilidade ao betão. O betão composto por resinas epóxi apresenta elevada resistência a aderência a outros materiais, assim como elevada resistência à fadiga, à fluência e química. Contudo os

polímeros epóxi são dispendiosos e não são aplicados no betão com a frequência desejada, sendo restringido a aplicações especiais que justifiquem o custo.

Assim sendo, o betão polimérico epóxi é usado para execução de pisos industriais, em painéis de fachadas e em revestimentos de materiais.

Betão Polimérico Furan

O polímero Furan também aplicado na produção de betão polimérico é constituído à base de álcool furfurílico, matéria derivada de produtos hortícolas como casca de arroz, casca de aveia, espigas de milho ou bagaço de cana do açúcar. A formação deste polímero é feita a partir da adição de álcool furfurílico, furfural ou formaldeído no pré polímero, resultando assim um polímero termo rígido altamente resistente. O Furan é aplicado como aglomerante em argamassas com a finalidade de aumentar a resistência química em pavimentos. Para além de uma excelente resistência química também apresenta uma excelente resistência a temperaturas elevadas e ao choque térmico.

Betão Impregnado em Polímero

A produção de betão impregnado em polímero começa com o processo de secagem da água e aplicação em vácuo uma solução de monómeros de baixa viscosidade a envolver o betão convencional de forma a preencher os poros do betão, contudo é um processo complicado e dispendioso, uma vez que a impregnação requer um enorme consumo de energia para que o monómero preencha todos os poros do betão. Contudo o betão pode ser parcialmente impregnado em polímero, de forma a haver uma poupança de consumo e, apesar de este processo implicar a diminuição do desempenho a nível de resistência mecânica e de durabilidade, há uma melhoria destas propriedades relativamente ao betão convencional, podendo ser vantajoso para determinadas especificações.

A forma ou processo usado na impregnação vai ditar as diferentes características do betão, embora seja também importante a natureza dos constituintes usados no betão convencional.

O processo de impregnação do betão é descrito na figura 16.

De uma forma geral, o betão impregnado em polímero apresenta significativas melhorias na resistência à compressão, tração, módulo de deformação, tal como de durabilidade, resistência à abrasão, absorção de água, resistência ao ataque de ácidos, bases e sais, resistência ao gelo e degelo, assim como melhor desempenho a danos causados em meios agressivos.

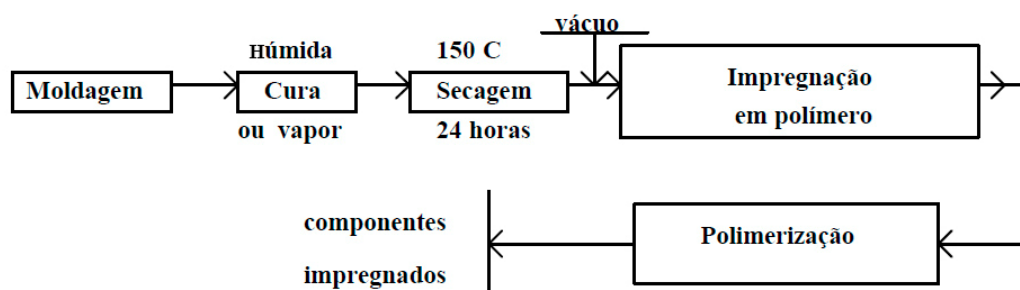


Figura 16 – Esquema de produção de betão polimérico impregnado [27].

De qualquer modo, o desempenho é sempre influenciado pelo sistema de impregnação do monómero e da profundidade penetrada nos elementos em betão. Contudo, para um aumento significativo da resistência mecânica do betão, o processo de impregnação deve ser acompanhado de ensaios de forma a controlar a carga adequada de polímero absorvido. Este tipo de processo é utilizado em alguns casos com o objetivo de certificar que os poros abertos à superfície, as microfissuras ou os defeitos nas faces do betão sejam suficientemente preenchidos, de forma a garantir uma maior durabilidade e o aumento da resistência a ataques químicos ou a ambientes críticos, evitando assim a degradação da armadura do betão.

Betão Modificado por Latex

O betão modificado por latex é um produto que apresenta uma vantagem relativamente a outros betões poliméricos por não necessitar de mudanças significativas no processo de produção, dado que apenas é adicionado aos constituintes do betão uma solução que contém polímeros, neste caso o latex durante a mistura. Contudo, este tipo de betão não apresenta significativa resistência à compressão, comparado com outros betões poliméricos, se bem que apresentem melhor resistência à compressão, tração, flexão e abrasão, tal como permeabilidade, aderência e, principalmente, resistência à penetração e agentes abrasivos.

O betão modificado por latex é concebido através de uma combinação de cimento Portland, agregados e água, combinado com uma solução polimérica. Esta mistura permite alterar as propriedades do betão. A solução polimérica de latex é uma suspensão coloidal de polímeros em água que é adicionada aos outros constituintes do betão sem recurso a qualquer outra tecnologia, ocorrendo o processo de polimerização por secagem ou perda de água [31].

Normalmente o latex contém 50% do peso em partículas muito pequenas de polímero, mantidas em suspensão na água por agentes ativos que, tendencialmente incorporam enormes quantidades de ar no betão, sendo necessário recorrer a agentes com características libertadoras de ar do latex. No entanto podem ocorrer microfissuras na pasta de cimento endurecida, devido às várias solicitações de evaporação de água, ou seja, retração por secagem.

A modificação do betão com latex permite não só reduzir a quantidade de água necessária para a produção do betão, mas também a saída de água através do bloqueio capilar do betão melhorando assim o processo de hidratação, tal como quando existe fissuração, uma vez que o filme de latex tapa os poros e restringe a propagação da fissura, como exemplo na figura 17.

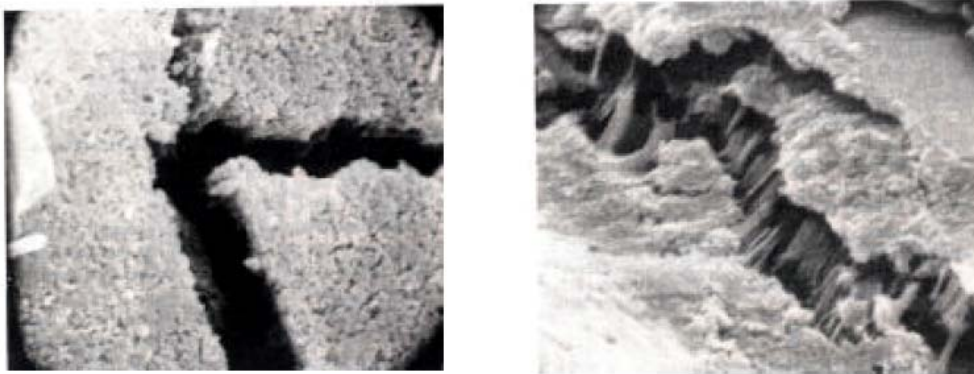


Figura 17 - Micrografia de betão convencional (direita) e betão modificado com látex (esquerda) [27].

3. Parte Experimental

3.1 Introdução

O presente capítulo visa analisar e demonstrar as vantagens da utilização de betões com carga polimérica, comparado com o betão convencional.

Como referido anteriormente, o betão com carga polimérica caracteriza-se como um material compósito em que uma resina termoendurecível liga inertes naturais, como por exemplo a areia de sílica, reforçando assim a estrutura base entre o cimento e os agregados, o que resulta numa maior capacidade de resistência à compressão, melhor permeabilidade e maior resistência ao ataque químico. Antes da mistura da resina com os inertes inorgânicos são adicionados os catalisadores e aceleradores inorgânicos para iniciar a reação de cura (polimerização). O betão de carga polimérica, devido às características poliméricas da sua matriz, exhibe propriedades e comportamentos distintos do betão convencional. Resumidamente, as vantagens dos betões de carga polimérica comparativamente aos betões convencionais são as elevadas resistências à compressão e flexão, durabilidade, permeabilidade muito baixa e tempos de cura rápidos (da ordem dos minutos ou poucas horas).

Neste trabalho fez-se um estudo experimental do comportamento à flexão de provetes prismáticos em betão de carga polimérica e betão convencional e ensaios à compressão em provetes cilíndricos em betão de matriz polimérica e betão convencional

O ensaio de flexão é realizado em materiais frágeis e em materiais resistentes, como o ferro fundido, alguns aços, estruturas de betão, entre outros materiais que são submetidos no dia-a-dia a situações onde o principal esforço é o de flexão.

Normalmente nos materiais frágeis, as flexas medidas são muito pequenas, e nestes casos, para determinar a tensão de flexão, utiliza-se a carga para provocar a fratura do provete. O ensaio de flexão para além de determinar a tensão e flecha

de rotura, permite avaliar outras propriedades mecânicas, nomeadamente o módulo de elasticidade à flexão.

Já a resistência à compressão é a característica mecânica mais importante do betão, pois a função deste material nas estruturas é, essencialmente, resistir às tensões de compressão.

A relação da dosagem entre água-cimento ou a natureza do ligante e a relação cimento-agregado, tal como a porosidade, são fatores que afetam a resistência à compressão do betão. Os agregados também têm um papel importante na resistência, pois as suas características mecânicas também influenciam os resultados. Assim, a granulometria, a máxima dimensão, a forma, a textura superficial, a resistência e a rigidez são aspetos a ter em conta no momento de seleção do material.

3.2 Preparação dos Provetes

Para a realização dos testes de flexão e compressão, foram preparados provetes de geometrias diferentes. Para os ensaios de flexão, os provetes foram produzidos em forma prismática com secção quadrada de 45x45mm de 260mm de comprimento, segundo a norma NP EN 12390-1. No caso dos ensaios de compressão os provetes foram de forma cilíndrica com secção circular de 70mm diâmetro e 150mm de altura, também conforme a norma NP EN 12390-1.

Tanto para os ensaios de flexão, como compressão foram preparados dois tipos de argamassa: argamassa para o betão convencional e argamassa com a adição de uma percentagem de resina epóxi para o betão polimérico.

Com vista a facilitar a apresentação e discussão dos resultados, os provetes foram identificados com a seguinte notação: “Betão N – T1” - provetes de betão convencional com hidratação fora de água; “Betão N -T2” - provetes de betão convencional hidratado dentro de água; “Betão PL –T1” - provetes de betão de carga polimérica hidratado fora de água e “Betão PL –T2” - provetes de betão de carga polimérica hidratado dentro de água.

3.2.1 Materiais

Os provetes preparados com argamassa convencional para a produção de betão continham uma parte de cimento de Portland da marca Secil, respeitando a norma EN 197-1 CEM II/B-L 32,5N, ou seja, com duas partes de areia normalizada e uma relação de água/cimento de 0,50% [32].

No caso dos provetes de betão de carga polimérica a argamassa foi produzida também com recurso ao cimento de Portland da marca Secil respeitando a norma EN 197-1 CEM II/B-L 32,5N, ou seja, duas partes de areia normalizada, tendo sido adicionado um aditivo, neste caso, resina epóxi SR 1500 comercializada pela empresa SICOMIN e o respetivo endurecedor SD 2503, também comercializado pela SICOMIN, misturados numa relação de 100/33g. A proporção adicionada de resina em relação ao cimento foi de 10%. A composição de cimento/resina resulta da formulação aplicada em estudos anteriores [33].

3.2.2 Mistura

A argamassa foi preparada por amassadura mecânica e compactada num molde em madeira, no caso dos provetes prismáticos, e em moldes de PVC, no caso dos provetes cilíndricos.

O processo iniciou-se com a mistura do agregado e do cimento durante um minuto até os dois componentes ficarem heterogéneos e ser adicionada a água.

Este processo de mistura manteve-se por mais 5 minutos até boa envolveria dos constituintes e por último foi adicionada a resina epóxi, no caso da argamassa preparada para betão de carga polimérica, mantendo-se a mistura por mais 5 minutos a fim de conseguir uma pasta homogénea (Figura 18).



Figura 18 - Argamassa com resina epóxi misturada.

Terminada a etapa de preparação de ambas as misturas, procedeu-se ao enchimento dos moldes (provetes prismáticos e cilíndricos), lentamente, deixando cair a argamassa de uma distância inferior a 5cm dos moldes, de forma a garantir melhor preenchimento dos espaços, ao mesmo tempo que se ia vibrando o molde (Figura 19). Assim, foi garantida a boa compactação da argamassa, importante para apurar resultados fidedignos.

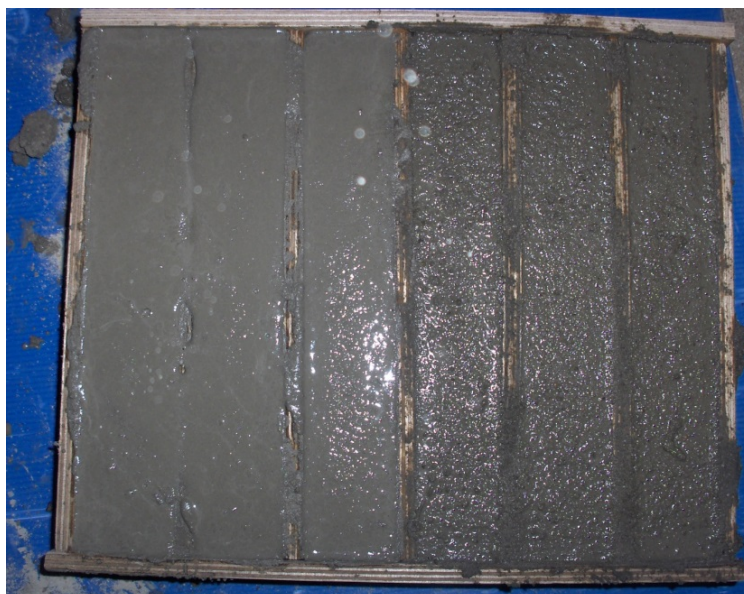


Figura 19 – Molde em madeira de provetes prismáticos com betão convencional e betão polimérico.

Após 24h do enchimento, os provetes foram retirados dos moldes, uma vez que já apresentavam boa estabilidade estrutural [33], seguindo para o processo de retificação das arestas e, posteriormente, para o processo de cura, mantendo os provetes num ambiente controlado e húmido, evitando assim a evaporação da água necessária para uma boa hidratação do cimento. Este processo demorou 3 dias, tempo mínimo indicado para o tipo de cimento usado e percentagem de água/cimento aplicada, de forma a garantir uma boa cura, tal como referido na literatura (Tabela 7) [32].

Tabela 7: Tempo mínimo de cura do betão, relativamente ao fato água/cimento [34].

Tipo de Cimento	Fator Água/Cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III-32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II-40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V-ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

De seguida, um dos provetes de betão convencional e um provete de betão de carga polimérica, de cada uma das geometrias, foi colocado dentro de água, à temperatura ambiente, durante 25 dias seguidos, de forma a existir absorção de água até ao ponto de saturação (Figura 20). As normas NP EN 12390- 3 e NP EN 12390-5 [35, 36] referem que os testes de flexão e compressão devem ser realizados com provetes que estejam submersos em água, e sejam retirados de seguida para a realização dos testes. Desta forma, é possível avaliar como os dois processos de cura influenciam os testes de flexão e de compressão. Os restantes provetes mantiveram-se à temperatura ambiente.



Figura 20 – Provetes prismáticos imersos em água.

A hidratação rápida, com influência de temperatura elevada, aumenta a degradação dos poros devido à evaporação da água no processo de cura e, conseqüentemente aumenta a capacidade de absorção de água e perda de impermeabilidade. Assim, é importante assegurar que o processo de cura é realizado em condições ideais para a obtenção resultados de confiança [19].

Deste modo, neste estudo também foram testados provetes de betão convencional e de betão de carga polimérica que passaram pelo processo de cura, fora de água, de forma a compreender como as propriedades da resina epóxi poderiam ser uma vantagem no processo de cura rápida.

De facto, quando ocorre uma evaporação rápida da água no processo de hidratação, o tamanho dos poros é maior que o normal, uma vez que o espaço deixado pela água não será ocupado por nenhuma matéria. Estas conseqüências influenciam as capacidades mecânicas do material [19]. A adição da resina funciona como elo de ligação dos constituintes do betão, e é determinante compreender como a resina poderá ser uma vantagem no processo de cura “seca” do betão.

3.3 Ensaio de resistência à flexão

3.3.1 Considerações gerais

Os ensaios de flexão foram realizados conforme a norma NP EN 12390-5[35] com recurso ao equipamento Zwick Z100, que possui características ideais para ensaios de flexão, uma vez que permite controlar facilmente e com a precisão pretendida, o valor solicitado ao provete de betão e o respetivo valor de deformação ao longo do tempo.

A figura 21 mostra o equipamento utilizado e o posicionamento do provete pronto para realizar o teste.

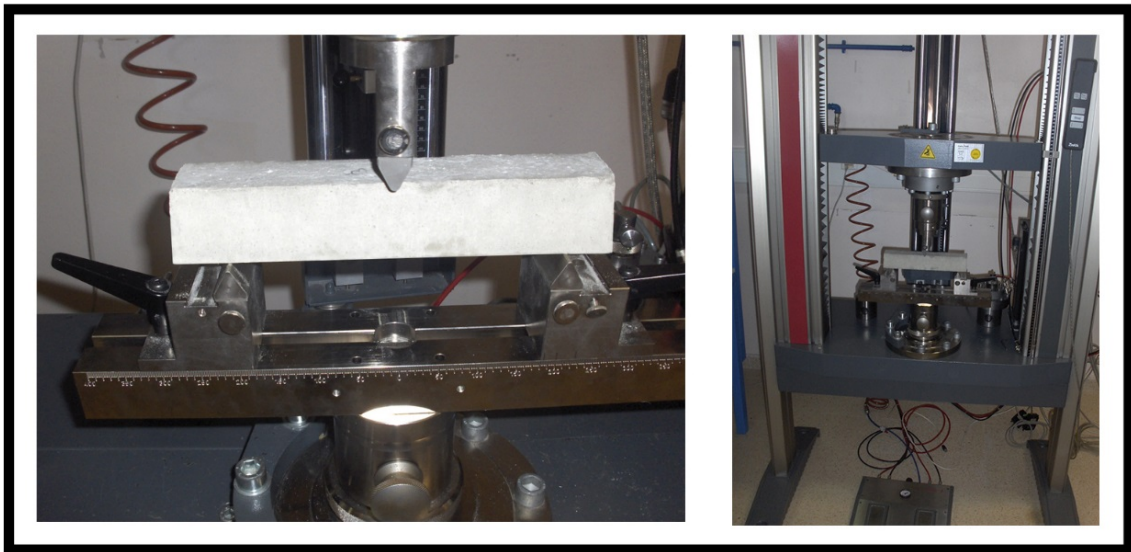


Figura 21 - Equipamento de ensaio à flexão com provete pronto para ensaio.

O ensaio de resistência à flexão em 3 pontos foi realizado sobre todos os provetes de secção quadrangular de 45x45mm e 260mm comprimento, consistindo na aplicação de uma carga constante, a uma velocidade de 0,06MPa

por segundo, concentrada a meio do vão, de 200mm até este atingir o momento máximo de rotura do provete por flexão. A figura 22 ilustra a configuração escolhida para o ensaio.

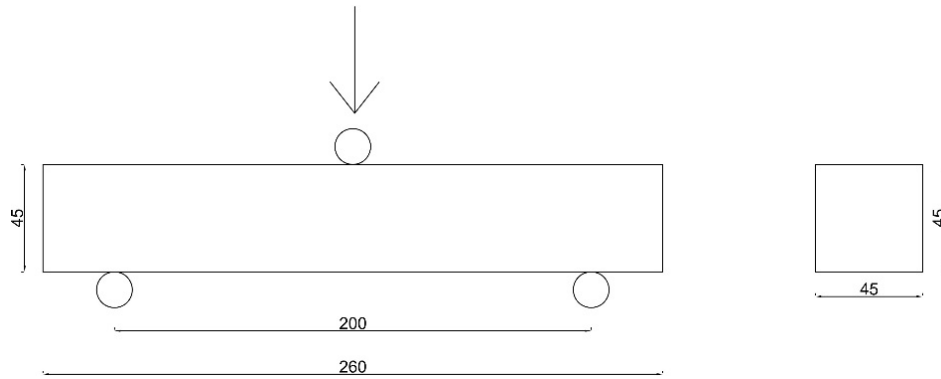


Figura 22: Esquema do ensaio de flexão.

A resistência à flexão é dada pela equação [36]:

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times I}{2 \times d_1 \times d_2^2}$$

onde:

- f_{cf} é a resistência à flexão, em MPa (N/mm^2);
- F é a carga máxima, em N;
- I é a distância entre os roletes inferiores de apoio, em mm;
- d_1 e d_2 são as dimensões laterais do provete, em mm.

Figura 23: Equação do ensaio de flexão [35].

3.3.2 Resultados e discussão dos ensaios à flexão

As figuras 24 e 25 traduzem os resultados dos ensaios de flexão usando os provetes que hidrataram fora de água, para ambos os materiais, betão convencional e betão polimérico, respetivamente. Da respetiva análise é possível constatar que o betão de carga polimérica apresenta melhores resultados que o betão convencional. Ou seja, a adição de 10% de resina epóxi à amassadura teve uma influência de cerca de 15% no aumento de carga até ao ponto de rotura face ao provete de betão convencional, assim como um aumento de flexão em cerca de 35%. O betão caracteriza-se por ser um material de baixa flexibilidade, no entanto, os resultados inerentes ao betão polimérico (Figura 25) demonstram que a resina epóxi funciona bem como ligante entre os vários agregados, permitindo, assim, dissipar parte da tensão aumentando assim o ponto de rotura.

Uma vez que o processo de cura destes provetes foi realizado ao ar livre, durante o processo de hidratação houve uma rápida perda de água e, conseqüentemente, um aumento de porosidade. No entanto, devido às propriedades adesivas, que permitem interligar os aglomerados do betão, e à elevada impermeabilidade, a perda de água durante o processo de cura foi menor no caso do betão de carga polimérica. Assim, é possível concluir que pelo facto de a resina conseguir ocupar o lugar deixado pela água, unindo os agregados, permite a obtenção de melhores resultados.

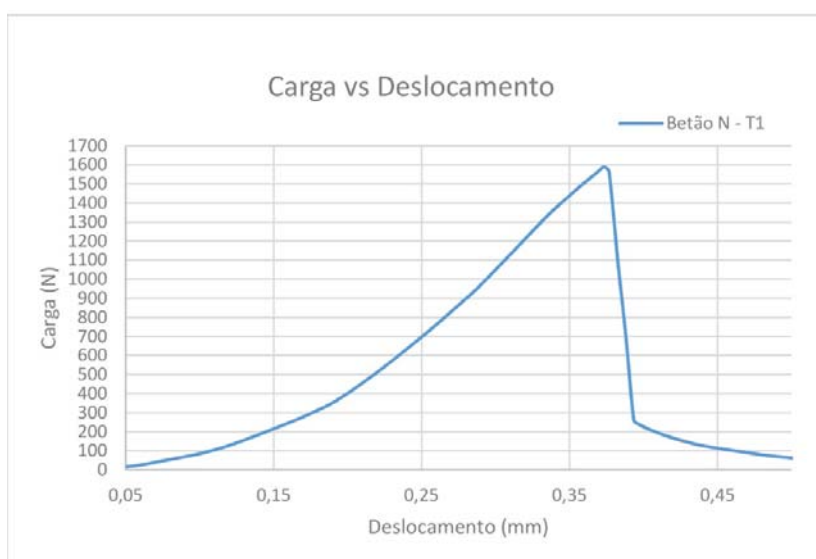


Figura 24 – Ensaio à flexão do betão convencional hidratado fora de água.

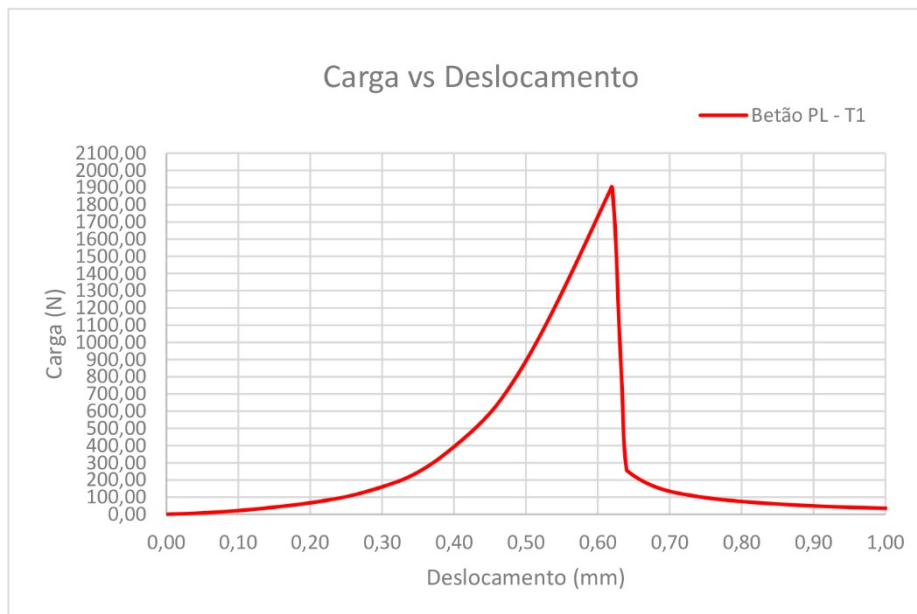


Figura 25 – Ensaio à flexão do betão polimérico hidratado fora de água.

As figuras 26 e 27 traduzem, respetivamente, os ensaios à flexão efetuados com os provetes de betão convencional e de betão polimérico hidratados fora de água, segundo a norma NP EN 12390-5 [35]. Neste caso, os resultados do betão de carga polimérica também se revelaram melhores que os de betão convencional.

Tal como referenciado no capítulo anterior, relativamente à resina epóxi, fica demonstrado que algumas das características desta, nomeadamente a elevada impermeabilidade e a boa capacidade adesiva, permitem a interligação dos aglomerados e a ocupação dos poros deixados pela evaporação de água. A análise das figuras 26 e 27 indica um aumento de cerca de 15% de capacidade de carga em relação ao provete de betão convencional e um aumento de deslocação até ao ponto de rotura em cerca de 35% comparado com o provete homónimo. O betão é um material caracterizado pela baixa ductilidade e, neste ensaio, com o recurso à adição de resina epóxi, é possível constatar que este ligante originou um ligeiro aumento na resistência mecânica e uma melhoria, em cerca de 35%, da capacidade de flexão do betão. Estes dados são importantes, tendo em atenção que o betão é um material que está sujeito a constantes e variáveis cargas, como no caso dos prédios de elevada altura, ou em tabuleiros de pontes suspensas, que estão sujeitas à força do vento e necessitam de uma

boa capacidade de diluição de tensão derivado aos vários efeitos de flexão que estão sujeitos.

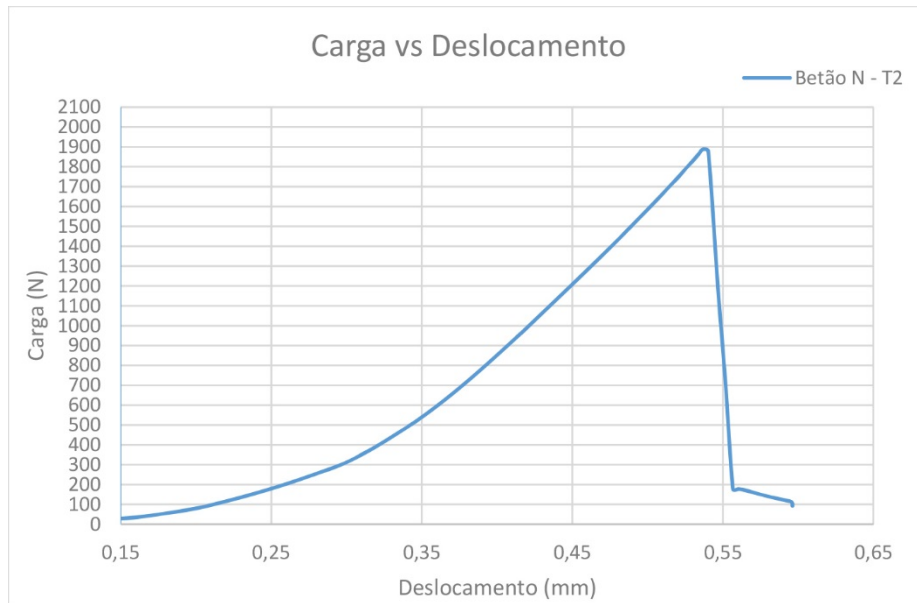


Figura 26 – Ensaio à flexão do betão convencional hidratado dentro de água.



Figura 27 – Ensaio à flexão do betão polimérico hidratado dentro de água.

A comparação das figuras 24 e 25 com as figuras 26 e 27 permite concluir que no caso dos provetes que passaram pelo processo de hidratação fora de água ocorre

uma rápida dissipação de água no processo de cura e, conseqüentemente, um aumento de porosidade, influenciando negativamente a capacidade mecânica dos provetes. No entanto, a adição de polímero ao betão consegue não só contrariar esta tendência, como melhorar o comportamento mecânico do betão.

Na produção de pavimentos em betão por exemplo, é possível que parte da estrutura tenha movimentos condicionados pelo atrito, pela armação de ferro ou ocorrerem tensões de tração ou flexão derivada á rápida retração por secagem. É normal ocorrerem tensões no cimento de Portland entre os 2 e os 5,5 MPa, e excederem esses valores sucedendo então a fissuração do betão [37].

Como foi verificado nos ensaios de flexão, a adição de resina ao betão apresenta vantagens no processo de cura, já que possibilita que o processo de retração ocorra naturalmente, evitando a fissuração do betão e permitindo assim uma aplicação adequada em obra, uma vez que requer menos cuidados durante o processo de hidratação, nomeadamente quando é necessário manter o betão num ambiente húmido quando a temperatura é mais elevada, reduzindo assim a mão-de-obra, recursos energéticos e naturais, no caso da água que é necessária para controlo da humidade, que é fator um fulcral para evitar a fissuração durante o processo de cura.

3.4 Ensaios de compressão

3.4.1 Considerações gerais

Os ensaios de compressão foram realizados conforme a norma NP EN 12390-3[36] com recurso ao equipamento Form+test, adequado para os ensaios de compressão, com capacidade de força até aos 3000KN. Este ensaio consiste em aplicar uma carga através de pratos de aço de alta resistência sobre um provete cilíndrico.

A figura 28 mostra o equipamento utilizado e o posicionamento do provete utilizado no ensaio.



Figura 28: Equipamento de ensaio compressão com provete pronto para ensaio.

O ensaio realizou-se com a colocação do provete cilíndrico de 150 mm x 75 mm sobre um prato metálico fixo, tendo sido aplicada uma carga constante, a uma velocidade de 0,6 MPa por segundo sobre toda a superfície de secção circular até ao momento que registou rotura.

Tal como no ensaio à flexão, foram utilizados provetes com características de hidratação diferentes.

A resistência à compressão é determinada pela equação [38]:

$$R_c = \frac{F_c}{40 \times 40} \text{ (MPa)}$$

F_c – carga máxima de rotura por compressão (N)

Figura 29: Equação do ensaio de flexão [36].

3.4.2 Resultados e discussão

A figura 30 mostra os resultados dos testes de compressão usando os provetes de betão convencional e de betão polimérico, hidratados dentro e fora de água. A correspondente análise permite constatar que em ambos os casos o betão de matriz polimérica apresentou melhores resultados.

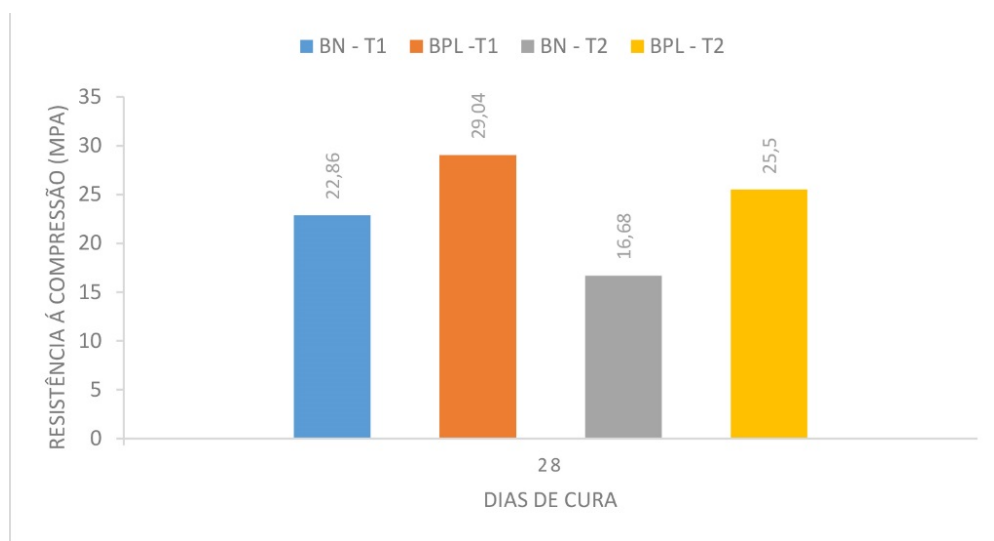


Figura 30 – Testes de compressão.

O processo de cura ocorrido sob saturação de água revelou que existe aumento da resistência à compressão de ambas as amostras de betão, face aos provetes de cura “seca”. No caso do betão convencional curado fora de água já eram expectáveis piores resultados, uma vez que o aumento da porosidade devido à secagem rápida se revelou prejudicial.

O betão de carga polimérica voltou a apresentar resultados superiores aos do betão convencional, confirmando que a adição da resina epóxi incrementa as propriedades mecânicas do betão. A resina epóxi, para além de permitir aumentar a resistência à compressão do betão, consegue retardar a dissipação de água no caso dos provetes curados fora de água, aspeto fulcral e determinante no processo de hidratação do cimento, já que viabiliza que o processo ocorra naturalmente. De facto, a resistência à compressão aumenta, como se pode comprovar pelos valores idênticos entre o betão polimérico curado fora de água e o betão convencional curado dentro de água. Este resultado demonstra a influência da resina nas propriedades de cura do betão, permitindo que este material seja aplicado na construção civil em ambientes com temperaturas mais altas propícias a uma má hidratação do betão.

Contudo, de acordo com o referido na literatura (Tabela 7) [32], estes valores poderiam ter sido mais elevados, caso a relação água/cimento fosse inferior. Neste trabalho foi usada a relação 0,50% e, caso tivesse sido usada a relação 0,35% ou, inclusive, inferior, como acontece no betão de elevado desempenho com recurso a aditivos específicos para substituir parte da água, seria possível que a resistência à compressão de ambos os provetes fosse superior.

4. Conclusão

O objetivo principal deste trabalho era caracterizar o betão de carga polimérica, comparando este tipo de material com o betão convencional usado normalmente na construção civil, de forma a compreender as vantagens da adição do polímero ao betão.

A resistência à tração por flexão, bem como a resistência à compressão, foram sempre superiores nos provetes com adição de resina polimérica, mesmo nos provetes sujeitos a um estágio de cura em ambiente seco.

No que concerne aos ensaios de resistência à flexão, ficou comprovado que a adição de resina epóxi melhora o comportamento mecânico do betão, aumentando a resistência à flexão em 15% e a flexibilidade em 35%. Este aumento é devido às propriedades da resina que viabilizam a ocupação dos poros deixados pela água durante o processo de cura, aumentando adesão entre os agregados e diminuindo também os pontos de tensão.

No que respeita à resistência mecânica à compressão, foi verificado um aumento de 22% em provetes curados de acordo com a norma. Já no caso dos provetes curados em estado seco, processo em tudo semelhante ao usado na construção civil tradicional, o aumento de resistência mecânica foi superior a 30%, ou seja, praticamente 1/3 de carga adicional que pode ser aplicada sobre o mesmo corpo.

Assim, o presente estudo apresenta dados importantes para o conhecimento sobre o uso dos métodos de cura nos betões convencionais, produzidos em diversas obras da construção civil, uma vez que a resina epóxi, devido à sua elevada impermeabilidade, consegue reter a água no corpo do betão, garantindo não só um processo de hidratação adequado mas também a resistência mecânica desejada.

Ainda, tendo em atenção as características adquiridas pelo betão devido à adição da resina epóxi, é viável a sua aplicação em diversos produtos de outros sectores, nomeadamente no sector do mobiliário urbano, dado ser possível produzir peças ou equipamentos com maior resistência num menor volume e com uma

resistência à tenacidade superior. Acresce que se recorre a um material barato e de fácil manuseamento como o betão.

Trabalhos futuros

O betão polimérico é considerado um dos mais recentes avanços na indústria, pela sua elevada resistência, durabilidade, impermeabilidade, sendo importante o desenvolvimento contínuo deste material. É espectável que no futuro seja possível baixar a elevada densidade do betão, aumentar a resistência mecânica ou diminuir a quantidade de matéria-prima extraída da natureza, através da adição de resina epóxi. Inclusive, é possível continuar a incluir resíduos tóxicos na composição do betão, uma vez que a resina epóxi impede a libertação de substâncias perigosas, permitindo também desta forma solucionar um problema ambiental, que já foi referenciado por vários autores [38]. Certamente que esta combinação de materiais será, sem dúvida, uma forma da Engenharia Civil contribuir para um futuro mais sustentável.

O presente estudou mostrou algumas potencialidades do betão polimérico, por recurso à adição de resina epóxi, Contudo, muito ainda poderá ser investigado no sentido de desenvolver este tipo de materiais, nomeadamente no que respeita às propriedades mecânicas, por exemplo, utilizando outras proporções cimento/resina, outros tempos de cura e, ainda, recorrendo a outros tipos de resinas.

Paralelamente, é imprescindível alargar a caracterização dos materiais desenvolvidos, analisando outras propriedades, das quais se destacam a retração, a fluência e a durabilidade do material em ambientes com características agressivas aos componentes do betão.

Bibliografia

1. Torgal, F.P.J., Said *Utilização de polimeros na melhoria da durabilidade do betão*.
2. Stanley, C., *Highlights in the History of Concrete*,. 1982(C&CA).
3. Carvalho, J.D.N.d., *Sobre as origens e desenvolvimento do concreto*. p. 18.
4. Appleton, J., *CONSTRUÇÕES EM BETÃO – Nota histórica sobre a sua evolução*.
5. *Basilica de Constantino*. [cited 2014 20 de Julho]; Available from: <http://pt.wikipedia.org>.
6. Borralho, A. *Panteão de Roma*. 2012 [cited 2014 20 Julho]; Available from: <http://anaborralho.com/tag/pantheon>.
7. Prince, W.H., *The practical qualities of cement*. ,ACI journal, 1974.
8. Tennis, P.D., *Concrete technology today*. Portland cement association, 1988.
9. Neville, A., *Properties of Concrete* ed. F. Edition. 1997, England: Longman Group Limited.
10. Pimentel, J., *Betões Compactáveis – Resistência e durabilidade*, in *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, I.S.T.d. Lisboa, Editor. 2007.
11. Gomes, A.e.P., A.P, *Betão - Aspectos Normativos. Sebenta de Materiais de Construção II*, in *Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, I.S.T.d. Lisboa, Editor. 2011.
12. Montemor, M.F.e.C., A., *Materiais de Construção Guia de Utilização.*, in *Arquitectura e Vida. Engenharia e Vida*, . 2005.
13. Yan, T.S.A., *Técnicas e Laboratórias de Ensaio de Betões*. 2013: Lisboa.
14. *Rachão 90/180*. [cited 2014 25 Julho]; Available from: <http://www.granitender.pt>.
15. Costa, A.e.A., J., *Materiais. Folhas de Apoio à cadeira de Estruturas de Betão I*, I.S.T.d. Lisboa, Editor. 2002.
16. Fernandes, P., *Vigas de Grande Vão Pré-fabricados em Betão de Alta Resistência Pré-esforçados – Viabilidade, Dimensionamento, Fabrico e Comportamento*, in *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*, U.d. Coimbra, Editor. 2005.
17. Mehta, P.K., *Mineral Admixtures for Concrete – An Overview of Recent Developments*. 1994: University of New Hampshire.
18. Neville, A.M., Aitcin, P.-C.,, *High-performance concrete – an overview, Materials and structures / Matériaux et construction*. 1998.
19. Camões, A. *Betões de elevado desempenho*. 2006.
20. VENDRUSCOLO, M.A. *Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos Fibrosos para Aplicação como Reforço de Base de Fundações Superficiais*. 2003.
21. SCHUPACK, M.S., W. R. , *Seven case studies of synthetic fiber reinforced slabs*. 1992.
22. Figueiredo, A.D., *Betão reforçado com fibras*. 2011: São Paulo.
23. Watanabe, P. *CONCRETOS ESPECIAIS – PROPRIEDADES, MATERIAIS E APLICAÇÕES*. 2008.
24. BENTUR, A.M., S. *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 1990.
25. Fernandes, N., *Caracterização do Betão Reforçado com Fibras de Aço*. 2012: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa.
26. SitUrbanDesign. 2015 [cited 15-03-2015].
27. Ferreira, O.P., *CONCRETOS POLÍMEROS*, in *PALESTRA SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS - POLÍMEROS*.
28. Ribeiro, M.C.S., *Mechanical Behaviour of Polymer Concrete*, in *In CCC2001 Composites in Construction*. 2001, FEUP: Porto.
29. Costa, B. *COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS EM CONCRETO POLIMÉRICO*. 2011.

30. Monteiro, D.F., *Comportamento à fractura e à fluência de betões poliméricos*. 2005.
31. MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M *Concreto: estruturas, propriedades e materiais*. 1994.
32. Cimpor, *Manual da Construção*, Cimpor, Editor.
33. Tavares, A. *Síntese e Caracterização de pastas de cimento aditivadas com resinas epóxi - Análises cinéticas, Termodinâmicas e Calorimétricas*. 2010.
34. <http://blogdopetcivil.com/2012/05/04/cura-do-concreto-de-cimento-portland/>. [cited 18-10-2014].
35. Qualidade, I.-I.P.d. *Norma Portuguesa NP EN 12390-5 Ensaio do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes*. 2009.
36. Qualidade, I.-I.P.d. *Norma Portuguesa NP EN 12390-3 Ensaio do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes*. 2009.
37. 223, A., *Standard Practice for the use of Shrinkage - Compensating Concrete*, A.C. Institute, Editor.
38. Torgal, F.G., J. Jalali, S., *Argamassas Obtidas Através da Activação Alcalina de Lamas Residuais de Minas. Eficiência Técnico-Económica na Reparação de Elementos de Betão*.

Anexos

Glossário
