



Avaliação da Resistência ao Corte Longitudinal da Interface Betão-Betão em Elementos Pré-Fabricados

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Dissertação

Sandra Correia Carvalho Rito

Leiria, Março de 2021



Avaliação da Resistência ao Corte Longitudinal da Interface Betão-Betão em Elementos Pré-Fabricados

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas

Dissertação

Sandra Correia Carvalho Rito

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Paulo Alexandre Lopes Fernandes, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação do Doutor Pedro Miguel Duarte Santos.

Leiria, Março de 2021

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Construções Civas, no ano lectivo 2020/2021, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação deste trabalho.

À Minha Família

Agradecimentos

Aos professores Paulo Fernandes e Pedro Santos pela oportunidade de poder trabalhar sob as suas orientações, pela atenção evidenciada, pelas sugestões, pela descontração e ao mesmo tempo pelo rigor e por toda a disponibilidade, sempre demonstrada por ambos, ao longo do tempo decorrido;

À Basf Portugal e à Sika Portugal pela cedência dos respectivos retardadores de presa, possibilitando assim o cumprimento do programa laboratorial previsto;

À Engenheira Vânia Marques pela importante ajuda em todas as tarefas laboratoriais desde a fase mais embrionária do estudo;

Ao meu colega e amigo João Baptista pela prontidão, demonstrando disponibilidade ainda antes de a ajuda ter sido solicitada e mesmo tendo os seus próprios trabalhos em desenvolvimento não deixou de manifestar empenho e auxílio;

À minha colega e amiga Mariana Pereira pela motivação, companhia e apoio ao longo de todo o percurso;

À minha amiga Joana Matias pela constante e inesgotável paciência e pelo forte e decisivo incentivo à conclusão do presente trabalho, nunca me deixando “baixar os braços”;

Àqueles, entre familiares e amigos, cujo contributo, directo ou indirecto, demonstrado das mais variadas formas, foi também relevante nesta caminhada;

Aos meus pais, ao meu irmão e ao meu avô, que partiu no entretanto.

Resumo

As interfaces betão-betão são um ponto fulcral na resistência da ligação entre betões de diferentes idades, pois a eficiência do sistema estrutural é dependente das mesmas. Deste modo, com a presente dissertação pretende-se fazer uma revisão bibliográfica abordando os mecanismos de transferência de esforços inerentes a esta temática e identificar e estudar parâmetros que condicionam o comportamento das interfaces.

As condições em que se apresenta a superfície de um substrato de betão que recebe um betão complementar podem comprometer a durabilidade e a qualidade da ligação entre estes. A rugosidade revela ter um papel importante no que a isto diz respeito, tendo sido realizado um estudo experimental que contempla cinco diferentes condições de rugosidade para a interface.

Tendo por base o conhecimento do efeito do açúcar (sacarose) como retardador de presa, e com o intuito de ponderar e comparar opções alternativas à utilização de produtos químicos no tratamento de superfícies de betão, o programa laboratorial realizado avaliou o comportamento da interface com: 1) Superfície Sem Tratamento; 2) Superfície Raspada Manualmente; 3) Superfície tratada com Retardador de presa (comercial) 1; 4) Superfície tratada com Retardador de presa (comercial) 2 e 5) Superfície tratada com uma solução diluída de açúcar com água.

A análise dos resultados obtidos é apresentada no final desta dissertação, onde são expostas as conclusões retiradas da investigação desenvolvida bem como uma observação crítica aos resultados dos ensaios onde se incluem relações e análises entre os métodos e produtos estudados.

Palavras-chave: interface, superfícies, resistência, substrato, retardador, açúcar.

Abstract

The concrete-to-concrete interface plays an essential role in the bond strength between new and old concrete because the efficiency of the structural system depends on it. The present thesis aims to do a state-of-the-art review and report the load transfer mechanisms, identifying and studying the parameters that influence this behavior.

The status of the surface existing conditions can compromise the durability and quality of the connection between them. The surface roughness is a crucial aspect; therefore, an experimental study was developed aiming five interface reactions distinguished by the application of five different methods to enhance the surface roughness.

Based on the knowledge of the effect of sugar as a surface retarder, in order to evaluate and compare alternative products instead of using chemicals in the treatment of concrete surfaces, the experimental program assessed the following interface behaviors: 1) No Treatment; 2) Wire brush; 3) Chemical retarder 1; 4) Chemical retarder 2 and 5) Sugar-based retarder.

The analysis of the results obtained is presented at the end of this dissertation, where the conclusions are drawn, and a critical remark to the tests which include relations and analysis of the studied methods and products are exposed.

Keywords: interface, surfaces, strength, substrate, retarder, sugar.

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	v
Agradecimentos	ix
Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de figuras	xvii
Lista de tabelas	xxi
Lista de símbolos, siglas e acrónimos	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Estrutura e organização da dissertação	4
2. Interfaces Betão-Betão.....	5
2.1. Mecanismos de transferência de esforços	5
2.1.1. Adesão	6
2.1.2. Coesão	7
2.1.3. Atrito	8
2.1.4. "Efeito de ferrolho"	8
2.2. Parâmetros que condicionam o comportamento	9
2.2.1. Preparação da superfície do substrato	9
2.2.2. Propriedades mecânicas do material	14
2.2.3. Teor de humidade do substrato	14
2.2.4. Temperatura.....	15
2.2.5. Condições de cura	15
2.2.6. Fissuração	16
2.2.7. Agentes de ligação	16
2.2.8. Estado de tensão na interface.....	17
2.2.9. Fadiga.....	17
2.2.10. Existência de armadura cruzando a interface	18
2.2.10.1. Conectores.....	18
2.3. Evolução dos modelos teóricos de estimação da resistência ao corte longitudinal	18
2.3.1. Anderson, 1960.....	19
2.3.2. Birkeland e Birkeland, 1966.....	19
2.3.3. Mattock e Hawkins, 1972.....	20
2.3.4. Loov, 1978.....	20
2.3.5. Walraven, Frénay e Pruijssers, 1987.....	20
2.3.6. Randl, 1997.....	21

2.3.7.	Santos e Júlio, 2009	21
2.4.	Expressões de dimensionamento.....	22
2.4.1.	Eurocódigo2	22
2.4.2.	ACI-318	23
2.4.3.	Model Code 2010	25
2.5.	Ensaio de avaliação da resistência ao corte	26
3.	Estudo Experimental	29
3.1.	Planeamento e métodos do ensaio laboratorial	29
3.2.	Materiais.....	32
3.2.1.	Betão.....	32
3.2.2.	Retardadores de Presa.....	34
3.2.2.1.	Soluções comerciais	34
3.2.2.2.	Soluções de sacarose	35
3.3.	Realização dos provetes.....	37
3.3.1.	Primeira Fase - Substratos	37
3.3.2.	Segunda Fase – Adição de uma nova camada de betão ao substrato existente.....	40
3.4.	Equipamentos e procedimentos	41
4.	Resultados Experimentais	43
4.1.	Superfície sem tratamento (ST)	44
4.2.	Superfície raspada manualmente (RM)	45
4.3.	Superfície tratada com retardador de presa1 (RP1).....	46
4.4.	Superfície tratada com retardador de 2 (RP2).....	47
4.5.	Superfície tratada com Solução de Sacarose (SS)	48
4.6.	Discussão de Resultados.....	50
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	55
5.1.	Conclusões	55
5.2.	Desenvolvimentos futuros	56
	Referências.....	59
	Anexos.....	63

Lista de figuras

Figura 1- Laje pré-fabricada.....	1
Figura 2- Encamisamento de Pilar.....	2
Figura 3- Aspecto de uma junta de betonagem onde é visível a diferença entre os betões de diferentes idades	2
Figura 4- Corte na interface em elementos compósitos.....	3
Figura 5 - Modelo de escorregamento na interface.....	5
Figura 6- Contribuição da adesão (τ_{adh}), atrito (τ_{sf}) e efeito de ferrolho (τ_{sr}) na transferência de esforços	6
Figura 7 - Inter-bloqueamento dos agregados	7
Figura 8- Modos de rotura comuns em juntas indentadas: a) fissuração; b) esmagamento e c) deslocamento..	7
Figura 9 - "Efeito de ferrolho"	8
Figura 10 - Rugosidade média.....	10
Figura 11- Equipamento utilizado na obtenção de perfis de rugosidade.....	11
Figura 12 - Preparação da superfície: a) betonado contra cofragem metálica; b) escova de aço; c) jacto de areia; d) jacto granalha; e) raspado manual.....	12
Figura 13- Humidade do substrato: a) substrato seco; b) substrato saturado com superfície molhada; c) substrato com superfície seca.....	15
Figura 14- Temperatura e humidade relativa: a) no interior do laboratório; b) no exterior do laboratório	16
Figura 15- Tipos de rotura: a) no agente de ligação; b) no betão de substrato; c) no betão adicionado; d) na interface entre o agente de ligação e o betão de substrato; e) na interface entre o agente de ligação e o betão adicionado; f) rotura mista	17
Figura 16- Tipos de conectores: a) Placa de solda ancorada com pregos de cabeça; b) Placa de solda ancorada por varões de reforço; c) Modelado na secção de aço; d) Conector com ângulo; e) Conectores inseridos no betão (adaptado de.....	18
Figura 17- " <i>Shear-friction theory</i> ".....	19
Figura 18 - Junta de construção indentada	23
Figura 19- Armadura que atravessa o plano de corte	24
Figura 20- Ensaios de avaliação da resistência da ligação de interfaces betão-betão	26
Figura 21 - "Bi-surface shear test".....	27
Figura 22-Diagrama de Gantt dos procedimentos laboratoriais efectuados	30
Figura 23- Esquemas representativos: a) Betonagem do substrato de betão; b) Configuração final do substrato	31
Figura 24- Exemplo dos provetes a ensaiar: a) Esquema representativo da segunda betonagem; b) Configuração final dos provetes a ensaiar.....	31
Figura 25- Esquema representativo do "bi-surface shear test" realizado	32
Figura 26 - Curvas granulométricas.....	33
Figura 27- Componentes do Betão	34
Figura 28- Betoneira utilizada.....	34
Figura 29- Esquema representativo da preparação para determinação da solução de sacarose a adoptar	36
Figura 30- Conjunto de moldes com calda de cimento.....	36
Figura 31- Medição de quantidades de açúcar a utilizar	36

Figura 32- Aplicação das soluções de sacarose	36
Figura 33- Conjunto de amostras identificadas.....	36
Figura 34- Pormenor de superfície.....	37
Figura 35- Aspecto da calda após ser raspada	37
Figura 36- Colocação das placas nos moldes metálicos	38
Figura 37- Confirmação das medidas previstas	38
Figura 38- Aplicação de óleo descofrante nas faces interiores	38
Figura 39- Enchimento dos moldes.....	38
Figura 40- Vibração do betão	38
Figura 41- Alisamento de superfícies.....	38
Figura 42- Substratos betonados.....	39
Figura 43- Escova de arame utilizada no raspado manual.....	39
Figura 44- Substratos antes da decapagem das superfícies.....	39
Figura 45- Equipamento de pressão	39
Figura 46- Decapagem de superfícies com tratamento através de jacto de água	39
Figura 47- Pormenor do jacto de água	39
Figura 48- Substratos após decapagem das superfícies	40
Figura 49- Pormenor de uma superfície decapada	40
Figura 50- Tanque de cura.....	40
Figura 51- Superfície sem tratamento	41
Figura 52- Superfície Raspada. Manualmente.....	41
Figura 53- Superfície Retardador de Presa 1	41
Figura 54- Superfície Retardador de Presa 2	41
Figura 55- Superfície Solução Sacarose.....	41
Figura 56- Colocação de substratos na cofragem.....	41
Figura 57- Moldes antes da betonagem.....	41
Figura 58- Moldes após betonagem	41
Figura 59- Provette compósito descofrado	41
Figura 60- Equipamento utilizado.....	42
Figura 61- Software PROTEUS	42
Figura 62- Colocação de provetes na Prensa	42
Figura 63- Ajuste da colocação da barra metálica	42
Figura 64- Resultados do ensaio à compressão dos provetes de referência para controlo da resistência	43
Figura 65- Ensaio dos provetes com interfaces sem tratamento (ST)	44
Figura 66- Resistências obtidas nas amostras sem tratamento.....	44
Figura 67- Ensaio dos provetes com interfaces raspadas manualmente	45
Figura 68- Resistências obtidas nas amostras tratadas com o raspado manual	45
Figura 69- Ensaio dos cubos com interfaces tratadas com o Retardador de Presa 1 (RP1)	46
Figura 70- Resistências obtidas nas amostras tratadas com o Retardador de Presa 1.....	47
Figura 71- Ensaio dos provetes com interfaces tratadas com o Retardador de Presa 2 (RP2)	48

Figura 72- Resistências obtidas nas amostras tratadas com o Retardador de Presa 2	48
Figura 73- Ensaio dos provetes com interfaces tratadas com Solução de Sacarose (SS)	49
Figura 74- Resistências obtidas nas amostras tratadas com Solução de Sacarose	49
Figura 75- Resistências médias registadas	51
Figura 76- Rotura não esperada nos provetes: a) ST3 e b) RP1-4	51
Figura 77- Rotura do provete RP2-2.....	52
Figura 78- Rotura do provete RM5	52
Figura 79 - Rotura do provete SS3: a) rotura pela interface e pelo betão de substrato; b) rotura pelo betão adicionado.....	53
Figura 80- Roturas monolíticas verificadas: a) PR2-2; b) RM1; c) SS4	53
Figura 81- Modos de rotura verificados para cada tratamento em estudo.....	54

Lista de tabelas

Tabela 1- Categorias de Rugosidade.....	10
Tabela 2- Valores recomendados para os coeficientes c e μ	23
Tabela 3- Valores recomendados para os coeficientes.....	24
Tabela 4- Coeficientes de atrito.....	25
Tabela 5- Descrição dos procedimentos apresentados no diagrama de Gantt.....	30
Tabela 6- Provetes realizados.....	30
Tabela 7- Características previstas.....	32
Tabela 8- Determinação do volume de betão necessário.....	33
Tabela 9- Composição do Betão.....	34
Tabela 10- Rugasol 2 Líquido.....	35
Tabela 11- Master Finish SRT 488 (Antes: Rheoface 488).....	35
Tabela 12 - Resistência Média dos provetes de referência.....	43
Tabela 13- Valores registados nos ensaios.....	50

Lista de símbolos, siglas e acrónimos

Letras gregas

γ_{coh}	factor de segurança para o coeficiente de coesão
γ_{fr}	factor de segurança para o coeficiente de atrito
α	coeficiente de resistência à flexão das armaduras; ângulo entre armadura e plano de corte
κ_1	coeficiente de interacção (ModelCode 2010)
κ_2	coeficiente de interacção (ModelCode 2010)
μ	coeficiente de atrito
ν_0	parâmetro determinado experimentalmente
ν_{Rdi}	valor de cálculo da tensão tangencial resistente na interface
ν_u	resistência ao corte longitudinal na interface
ρ	percentagem de armadura que atravessa a interface
σ_n	tensão de compressão
$\tau(s)$	esforço de corte na interface betão-betão
τ_a	tensão tangencial devido à adesão e inter-bloqueamento
$\tau_{adh}(s)$	tensão tangencial devido à adesão
τ_{coh}	tensão tangencial devido à adesão (Randl 1997)
$\tau_{sf}(s)$	tensão tangencial devido ao atrito
$\tau_{sr}(s)$	tensão tangencial devido ao "efeito de ferrolho"
τ_u	resistência ao corte na interface
ϕ	ângulo de atrito interno da interface

Letras latinas minúsculas

c	coeficiente dependente da rugosidade (EC2)
c_d	coeficiente de coesão (Santos e Júlio 2009)
f_c	tenção de rotura do betão à compressão
f_{cd}	valor de cálculo da tenção de rotura do betão à compressão
f_{ctd}	valor de cálculo da tenção de rotura do betão à tracção
f_y	tenção de cedência do aço
k	parâmetro de expressão (Anderson, 1960); constante para interface não fissurada (Loov, 1978)

Letras latinas maiúsculas

C_1	parâmetro de equação (Walraven et al., 1987)
C_2	parâmetro de equação (Walraven et al., 1987)
R_a	Rugosidade média
R_{vm}	Valor médio da profundidade do perfil da superfície
V_n	Resistencia ao corte (ACI-318)

Siglas e acrónimos

ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
LEBA	Laboratório de Estruturas e Betão Armado
RM	Superfície raspada manualmente
RP1	Superfície tratada com retardador de presa comercial 1
RP2	Superfície tratada com retardador de presa comercial 2
SS	Superfície tratada com solução de sacarose
ST	Superfície sem tratamento

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A pré-fabricação de estruturas surge como resposta à necessidade de elevar o ritmo de criação de habitações num curto espaço de tempo face à destruição deixada pela Segunda Guerra Mundial. É por isso que se regista, nesta altura, o considerável progresso destes sistemas construtivos, caracterizados por métodos industriais de produção em série e consequente redução de preços [1][2].

As estruturas pré-fabricadas apresentam vantagens no sentido em que são produzidas num ambiente controlado, contrariamente às condições "*in situ*", o que permite melhorar o controlo da qualidade, a optimização de processos de fabrico e a redução do tempo de execução em obra, sendo por estas razões produzidas em local distinto de onde são fabricadas [1]. As partes constituintes têm, assim, de ser transportadas para o local da construção, onde são montadas de forma a satisfazer as necessidades do projecto. Dependendo do tipo de elemento estrutural e processo construtivo, os elementos pré-fabricados podem ser: 1) totalmente executados em fábrica ou 2) apenas parcialmente. No primeiro caso a ligação entre peças faz-se normalmente por recurso a ligações mecânicas entre elementos estruturais. A segunda situação associa elementos pré-fabricados com elementos moldados no local, gerando uma interface entre betões de diferentes idades, como nas pré-lajes (Figura 1), onde se recorre à betonagem "*in situ*" contra um substrato de betão (endurecido) já existente, com ou sem recurso a agentes de ligação (resinas), podendo as peças finais ser consideradas como elementos compósitos.

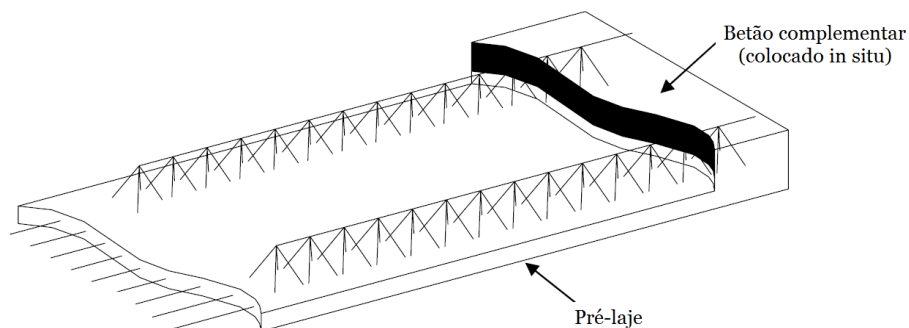


Figura 1- Laje pré-fabricada [3]

As interfaces betão-betão não estão, no entanto, exclusivamente relacionadas com estruturas pré-fabricadas, estando também presentes, por exemplo, no reforço estrutural de edificações já existentes através de encamisamento de betão (Figura 2) ou em juntas de betonagem (Figura 3) como efeito inevitável das comuns etapas da construção totalmente “*in situ*”.

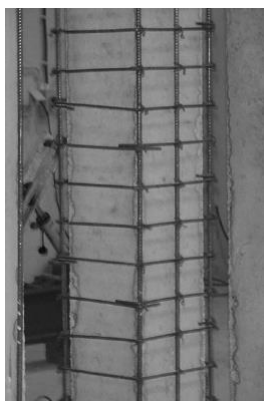


Figura 2- Encamisamento de Pilar [4]



Figura 3- Aspecto de uma junta de betonagem onde é visível a diferença entre os betões de diferentes idades [5]

Colocar betão fresco contra uma camada de betão já existente é, assim, uma tarefa usual na construção sendo também uma condição a respeitar pelo facto de muitas vezes não ser possível garantir a continuidade material resultante de uma só betonagem. Neste processo que se tem vindo a salientar em obras de reabilitação, a transferência de esforços através da ligação da interface entre o betão novo e o betão existente é considerado um aspecto crítico [6]. A ligação entre betões de diferentes idades tem, portanto, um papel fundamental na eficiência do sistema estrutural pois deve conferir características monolíticas ao mesmo. O seu propósito é transmitir forças entre as camadas e resistir às solicitações, essencialmente de corte, proporcionando resistência e rigidez ao elemento composto.

A pertinência destas ligações faz com que se dê especial atenção ao escorregamento entre camadas (Figura 4), ou seja, ao corte longitudinal da interface betão-betão, pelo que deve ser ponderada a utilização de conectores que cooperem no aumento da resistência na interface.

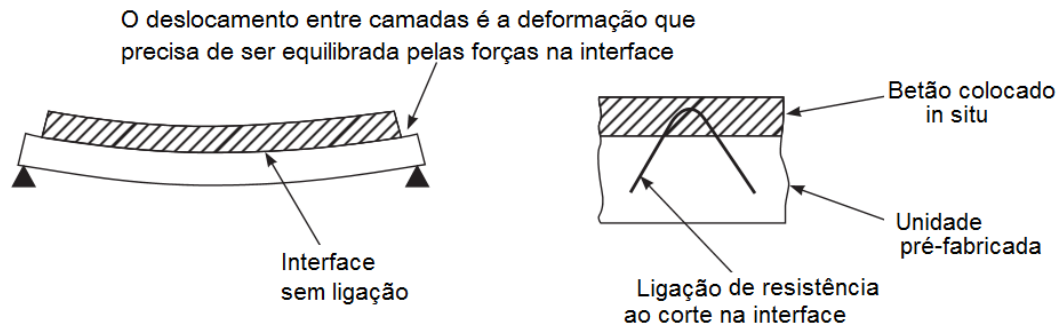


Figura 4– Corte na interface em elementos compostos (adaptado de [7])

Considera-se que a resistência ao corte resulta da combinação de quatro mecanismos de transferência de esforços: 1) adesão - originada pela ligação química entre as partículas do betão novo e do betão existente; 2) coesão - correspondente ao inter-bloqueamento dos agregados; 3) atrito - resultante do contacto entre as duas interfaces e do deslocamento relativo de ambas as partes de betão quando a interface se encontra sujeita a esforços normais de compressão; e 4) "efeito de ferrolho" (comumente designado por "*dowel action*") - caracterizado pela mobilização da armadura que atravessa a interface devido aos esforços actuantes.

Sendo vários os parâmetros que condicionam o comportamento das interfaces, torna-se fundamental analisar as características do substrato que permitam otimizar a qualidade da ligação, tornando-se a preparação da superfície dos elementos que recebem o betão complementar em obra um factor de grande relevância.

1.2. Objectivos

Os objectivos da presente dissertação centram-se em avaliar o comportamento das interfaces betão-betão tendo em conta diversos parâmetros que o condicionam. De uma forma mais específica, o estudo pretende:

- Caracterizar a influência do tratamento da superfície do betão do substrato no comportamento da ligação da interface betão-betão;
- Estudar soluções correntes, de baixo custo e com o mesmo efeito, como alternativa à utilização de produtos químicos para o tratamento da superfície de juntas de betonagem.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

Os conteúdos desta dissertação encontram-se dispostos por cinco capítulos que respeitam uma sequência interligada e elucidativa das temáticas expostas, consoante o desenvolvimento da informação apresentada.

Sintetiza-se no Capítulo 1, o enquadramento do problema, bem como a descrição dos objectivos que se pretendem alcançar com a elaboração do presente trabalho.

O Capítulo 2 aprofunda conhecimentos relativos às interfaces, incidindo no estado das superfícies que recebem betão, onde são descritos fundamentos necessários a uma melhor percepção de toda a envolvente relacionada com a resistência de ligações entre betões de diferentes idades.

O estudo experimental realizado no âmbito desta dissertação é descrito no Capítulo 3, sendo apresentados os métodos e os procedimentos utilizados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos no estudo experimental e a respectiva análise e discussão.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e propostas sugestões para futuros estudos que se consideram relevantes para a continuidade da aquisição de conhecimentos relativos a esta temática.

2. Interfaces Betão-Betão

Este capítulo pretende abordar as interfaces betão-betão no que se refere à transmissão de esforços entre os elementos e ao comportamento da interface, que é influenciado por diversos parâmetros, descritos adiante.

Serão abordadas expressões de dimensionamento adoptadas por regulamentos, assim como uma exposição das provenientes da investigação, concedendo visibilidade ao progresso do estudo dos modelos teóricos de previsão da resistência ao corte.

No final do capítulo são também identificados vários ensaios laboratoriais que visam avaliar o comportamento ao corte das interfaces.

2.1. Mecanismos de transferência de esforços

É através da combinação de mecanismos de transferência de esforços actuantes na interface betão-betão que se garante a homogeneidade da ligação ou do elemento como um todo. A transferência de corte pela interface (Figura 5) é um fenómeno complexo devido à sua dependência da textura da superfície, das suas propriedades físicas, padrões de esforço aplicado e da própria fabricação [7].

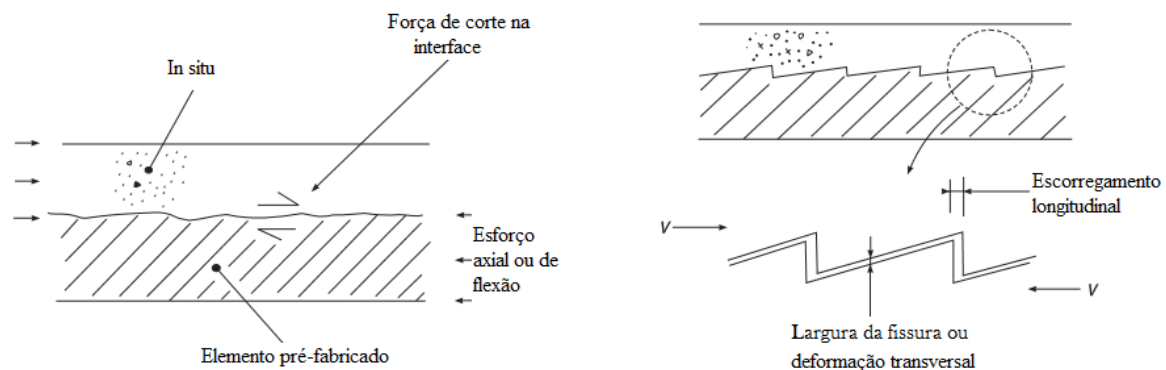


Figura 5 - Modelo de escorregamento na interface (adaptado de [7])

Zilch e Reinecke [8] afirmam que as forças de corte podem ser transferidas entre elementos de betão por adesão, atrito e por "efeito de ferrolho", sendo que cada um destes fenómenos colabora com diferentes contributos como sugere a Figura 6:

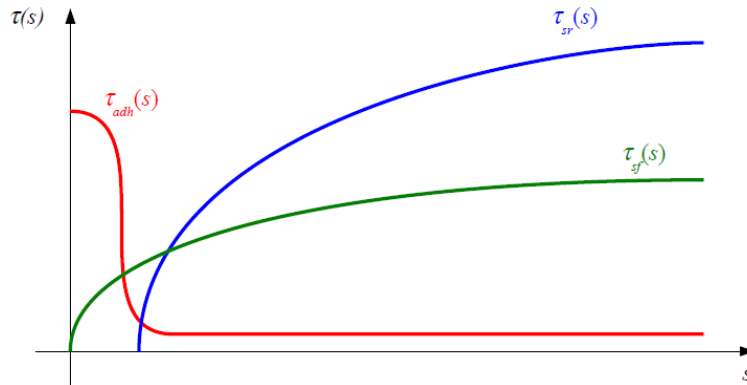


Figura 6- Contribuição da adesão (τ_{adh}), atrito (τ_{sf}) e efeito de ferrolho (τ_{sr}) na transferência de esforços [8]

A Figura anterior remete, assim, para a existência de três mecanismos que contribuem na transferência de esforço: adesão, atrito e "efeito de ferrolho", cuja soma resulta no esforço de corte $\tau(s)$ na interface betão-betão em função de uma dada fissura com um deslocamento longitudinal relativo, s , entre as partes de betão:

$$\tau(s) = \tau_{adh}(s) + \tau_{sf}(s) + \tau_{sr}(s) \quad (2.1)$$

Onde $\tau_{adh}(s)$ é a contribuição da adesão, $\tau_{sf}(s)$ é a contribuição do atrito e $\tau_{sr}(s)$ é a contribuição do "efeito de ferrolho" na transferência de esforço de corte.

Bissonnette [9], descreve que o mecanismo de adesão compreende a interação mecânica e a ligação química na fronteira entre dois materiais ligados por uma interface comum. No entanto, apesar de não existir consenso, consideraram-se quatro mecanismos, fazendo a distinção entre adesão (ligação química) e coesão (inter-bloqueamento) entre os betões de diferentes idades.

2.1.1. Adesão

A resistência ao esforço de corte por adesão pode ser definida como a transferência de tensões entre duas secções através da ligação química entre os materiais constituintes [10].

Comparada com outros mecanismos que contribuem para transferência de esforços na interface, a adesão é o mais sensível a contaminações da superfície. Para proporcionar uma boa adesão devem ser obtidas medidas apropriadas como a limpeza da superfície e qualidade do betão. A adesão toma, assim, valores muito baixos sendo geralmente desprezada [11].

2.1.2. Coesão

A coesão resulta da transferência dos esforços de corte por um mecanismo de inter-bloqueamento dos agregados (Figura 7) quando se atinge a capacidade máxima de carga e ocorre a separação da interface betão-betão [12].

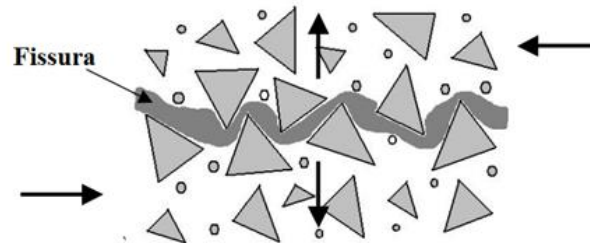


Figura 7 - Inter-bloqueamento dos agregados [13]

Paralelamente ao que acontece com as forças de adesão, também na coesão uma rugosidade adequada e um contorno de superfície irregular leva a efeitos deste bloqueio mecânico [11].

Também as juntas com interfaces indentadas manifestam um comportamento de inter-bloqueamento até que o seu efeito seja anulado por fissuração ou esmagamento local nas áreas de contacto mais carregadas. Quando o efeito de inter-bloqueamento diminui devido à degradação da interface indentada, reduzindo a transferência mecânica de carga, este comportamento transforma-se num puramente friccional com um deslocamento significativo ao longo do plano de fissuração [3]. Representam-se na Figura 8, os modos de rotura mais comuns:

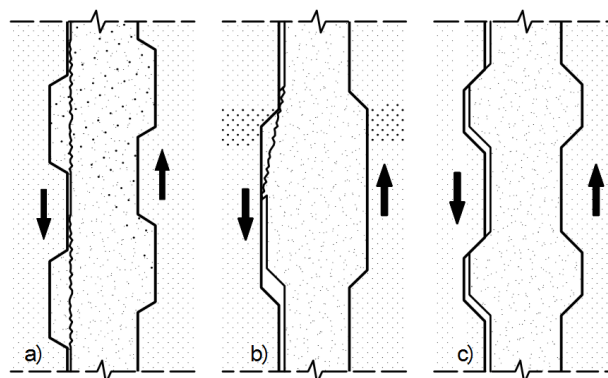


Figura 8- Modos de rotura comuns em juntas indentadas: a) fissuração; b) esmagamento e c) deslocamento (adaptado de [3])

2.1.3. Atrito

Segundo Casal [10], o deslocamento relativo entre as duas interfaces provoca um esforço resistente devido ao atrito gerado entre os dois materiais. Aquando deste, o contacto entre as duas interfaces origina um deslocamento normal à interface responsável pela mobilização da sua armadura transversal. Qualquer presença de esforço normal de compressão a actuar transversalmente à interface contribui para o aumento do atrito. Distinguem-se dois modelos para analisar e quantificar este efeito, estando eles associados ao mecanismo de atrito (Birkeland e Birkeland [14]) e ao inter-bloqueamento de agregados (Walraven e Reinhardt [15]). O modelo de Birkeland e Birkeland [14] considera essencialmente que toda a resistência é conferida pelo atrito. Por outro lado, o modelo de Walraven [15] considera que a resistência ao corte não está unicamente dependente do atrito mas também do efeito local da distribuição de tensões no betão.

2.1.4. "Efeito de ferrolho"

O efeito de ferrolho é um mecanismo básico na transferência de forças de corte [3] que surge quando, na presença de uma fissura ou junta, existe um deslocamento relativo suficiente para mobilizar a armadura que atravessa a interface (Figura 9).

Com a ocorrência de deslocamento entre as duas camadas de betão, a armadura de reforço que atravessa a interface é traccionada podendo provocar cedência da mesma. Deste modo, esta armadura irá causar uma compressão na interface aumentando o atrito entre elas e, conseqüentemente, a capacidade de transferência de carga desta interface. Devido ao deslocamento relativo entre camadas, a armadura será sujeita a um esforço de corte provocando assim o "efeito de ferrolho" [12].

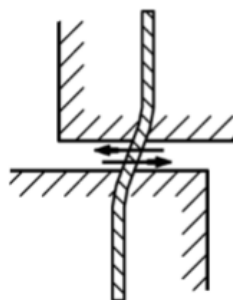


Figura 9 - "Efeito de ferrolho"[3]

2.2. Parâmetros que condicionam o comportamento

A resistência da ligação da interface betão-betão é influenciada por diversos parâmetros, contribuindo cada um deles de uma forma mais ou menos significativa na resistência ao corte. Contudo, nem todos são considerados nas expressões de dimensionamento presentes nos actuais regulamentos como se aprofundará no ponto 2.4. Apresentam-se a seguir os principais parâmetros que condicionam a ligação das interfaces.

2.2.1. Preparação da superfície do substrato

No que toca à preparação das superfícies, há que ter em consideração duas circunstâncias distintas: 1) Preparação do substrato num contexto de reabilitação, onde um substrato de betão existente terá de ser tratado para receber um novo betão; 2) Preparação do substrato num contexto de pré-fabricação, sabendo “*a priori*” que este receberá um betão complementar.

Em qualquer um dos casos, as condições em que se encontra o betão existente são de elevada importância pois a superfície de contacto deve apresentar propriedades que optimizem a ligação entre as duas camadas de betão [16, 17].

Santos [18] menciona que a preparação da superfície do substrato é estabelecida basicamente por dois procedimentos, indicando o aumento da rugosidade e a limpeza da superfície como factores de grande destaque na aderência entre betões de diferentes idades.

A rugosidade está, assim, directamente relacionada com o eficiente comportamento da interface betão-betão pois a resistência do conjunto é altamente influenciada pela mesma, o que a torna um dos parâmetros mais condicionantes [12]. Quando a interface tem uma certa rugosidade, as forças de corte podem ser transmitidas por atrito mesmo que haja fissuração [3].

O actual modelo de dimensionamento proposto pela Federação Internacional do Betão [11], bem como a norma europeia Eurocódigo 2 [19] sugerem uma classificação qualitativa no que se refere à identificação da rugosidade imposta às superfícies, como se particularizará posteriormente na secção 2.4. que é alusiva às expressões de dimensionamento. Estes documentos definem as superfícies como muito lisas, lisas, rugosas ou indentadas, apreciação esta que pode ser subjectiva uma vez que é passível de erro humano. Segundo Santos e Júlio [16] esta limitação pode ser resolvida adoptando uma avaliação quantitativa. A implementação deste tipo de avaliação apresenta o benefício de

promover a padronização dos métodos de quantificação de rugosidade e a definição dos métodos mais adequados para uma dada superfície. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é a rugosidade média R_a (Figura 10), geralmente adoptado pela sua simplicidade, sendo definido pelo desvio médio do perfil em relação à sua linha média [16]:

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (2.1)$$

Onde n é o número de medições discretas e z_i representa a amplitude de cada medição.

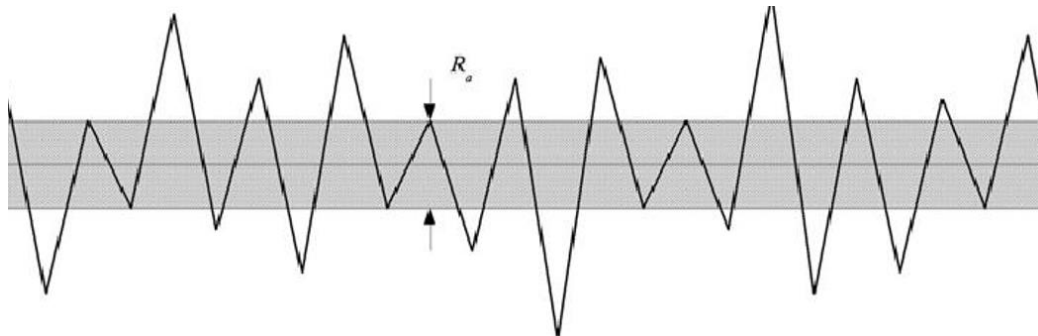


Figura 10 - Rugosidade média[16]

Este parâmetro (R_a) apesar de ser reconhecido pelo Model Code 2010 [11] como um importante agente na resistência ao corte da interface, não é um método exacto para caracterizar a rugosidade das superfícies. De acordo com o modelo em questão, observam-se as distinções entre categorias na seguinte tabela:

Tabela 1- Categorias de Rugosidade[20]

Categorias	Características	R_a [mm]
Muito Lisa	Superfícies moldadas por aço	Não mensurável
Lisa	Superfícies não tratadas ou moldadas por cofragem de madeira	<1.5mm
Rugosa	Superfícies tratadas com jacto de areia, jacto de água	≥ 1.5
Muito Rugosa	Superfícies indentadas ou tratadas com jacto de água de alta pressão	≥ 3

Santos e Júlio [21] descrevem um estudo onde é avaliado um equipamento desenvolvido especificamente para caracterizar a rugosidade de substratos de betão com recurso a *laser*. Foi concluído que é possível obter um perfil de rugosidade da superfície do substrato e, a partir dele, determinar parâmetros de rugosidade. O método proposto apresenta vantagens

como a maior precisão, simplicidade, rapidez de execução, ser um procedimento não destrutivo e o facto dos resultados poderem ser avaliados "*in situ*".



Figura 11- Equipamento utilizado na obtenção de perfis de rugosidade [21]

Em situações onde as superfícies de betão são recuperadas, o tratamento da área danificada é, como já foi mencionado, um factor crítico para a durabilidade da ligação, que pode ser seriamente comprometida se existir uma fraca adesão entre o betão adicionado e o betão existente. Deste modo é importante a existência de uma superfície livre de sujidades que possam afectar ou deteriorar a reparação. O betão danificado ou fracturado deve ser removido até se obter uma superfície sã que por sua vez admita os processos de tratamento para obter a rugosidade desejada [17]. De uma forma geral, identificam-se três categorias de processos de tratamento de superfícies [17]: a) mecânicos; b) térmicos e c) químicos.

a) Processos mecânicos

Geralmente os equipamentos mecânicos são manuais, intensivos e os mais seguros. Contudo, o pó, o barulho e as vibrações geradas por este método não são desejáveis e em algumas circunstâncias podem nem ser permitidos. Quando se escolhem e aplicam estes processos, deve-se verificar o estado do betão existente e caso exista armadura, esta não deverá ser danificada. Durante um processo mecânico de tratamento das superfícies, vão sempre surgir poeiras, devendo as partículas ser eliminadas. Tal pode ser efectuado através de vácuo, ar comprimido ou com um jacto de água sob pressão, quando o humedecer do betão não seja uma desvantagem para as operações seguintes, ou quando existir tempo suficiente para secar a superfície [17].

De entre os processos mecânicos mais utilizados para o tratamento de superfícies, destacam-se a picagem manual, picagem com martelos pneumático, eléctrico e de agulhas, jacto de água, jacto de areia, jacto de granalha e escovas de aço, podendo, assim, ser obtidos diferentes perfis de rugosidade (Figura 12).

Quando se trata da preparação de superfícies de substratos de betão para fins em que já está prevista uma posterior betonagem contra os mesmos, estando por isso o betão do substrato num estado fresco e moldável, a rugosidade pode ser conferida ao substrato por meio de processos descritos anteriormente, ou, por exemplo, através de simples raspado manual (Figura 12-e)) assim que se verifique o início do endurecimento do betão.

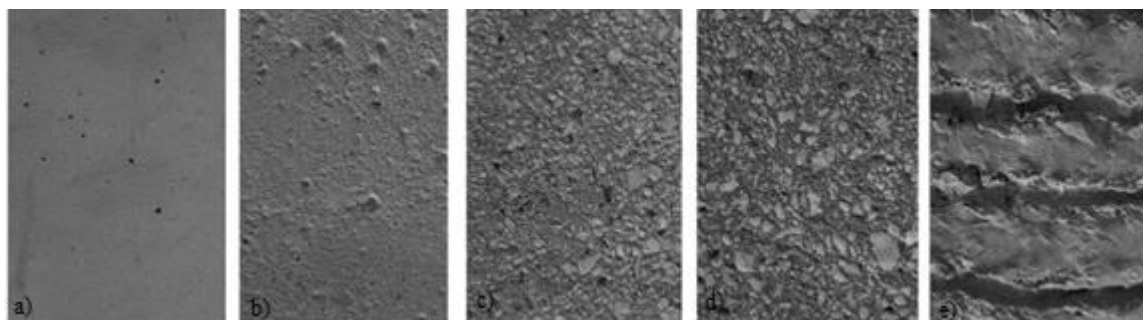


Figura 12 - Preparação da superfície: a) betonado contra cofragem metálica; b) escova de aço; c) jacto de areia; d) jacto granalha; e) raspado manual [22]

b) Processos térmicos

Estes processos são usualmente aplicados em trabalhos de reabilitação e durante os mesmos, a superfície do betão é aquecida até 1500°C com uma chama a 3200°C, o que produz um choque térmico. Este, devido ao intenso gradiente de temperatura perpendicular à superfície de betão e os diferentes coeficientes de expansão térmica dos agregados de pedra e cimento, conduzem a esforços provocando a escamação da superfície do betão [17]. Devido às altas temperaturas da chama do equipamento - maçarico [23], deve também ter-se em atenção a presença de armaduras, não podendo ser garantida a não fragilidade em profundidade do betão. Por esta razão, após o betão removido por um processo térmico, a última camada deve ser removida mecanicamente. Estes métodos apenas devem ser aplicados por entidades qualificadas e mão-de-obra experiente [17, 23].

c) Processos químicos

Podem ser usados ácidos e bases para a remoção do betão nas situações em que se pretende reabilitar uma estrutura danificada. Devido ao risco de corrosão das armaduras, os ácidos não devem ser utilizados em betão armado e/ou pré-esforçado. Em casos com falta de controlo dos procedimentos, existe o risco de impacto contrário ao das propriedades de adesão do betão e existe, ainda, o risco de dano a longo prazo da saúde dos trabalhadores [17], tornando-se esta a maior desvantagem deste método. Alguns produtos são altamente

perigosos e quando utilizados inapropriadamente podem levar a graves lesões, sendo por isso requerida a utilização de equipamentos de protecção. Consequentemente, acresce o problema associado ao destino dos materiais residuais, incluindo soluções ácidas, que resultam da lavagem das superfícies, que devem ser tratados de acordo com regulamentos específicos [12].

Pelos perigos associados a estes métodos, o processo químico não é frequentemente recomendado e para se efectuar o descrito anteriormente, o betão deve apresentar determinados requisitos, devendo ser realizada uma avaliação da resistência da superfície do betão [17].

Quando se pretendem rugosidades em substratos de betão pré-fabricados aos quais está prevista a adição de um novo betão, a preparação da superfície pode ser efectuada quimicamente através do contacto entre retardadores de presa e a superfície destinada a esse fim. Estes adjuvantes são produtos que prolongam o tempo de transição do estado plástico para o estado rígido do betão e deste modo é possível obter agregados à vista mediante a lavagem da superfície tratada após a presa do substrato. A rugosidade obtida desta forma deve levar em consideração as indicações dos fabricantes dos retardadores de presa.

Na tentativa de alcançar um betão “amigo do ambiente” têm sido feitos testes utilizando retardadores de presa naturais, sendo o açúcar (sacarose) um dos produtos que já foi testado experimentalmente [24, 25]. Foi demonstrado que soluções deste produto natural funcionam, de facto, como se de retardadores de presa se tratassem.

Bruere [26], citado por Yamamoto [27] teria já verificado na década de 60, o efeito do açúcar como retardador de presa em pastas de cimento.

Apesar de não se tratar efectivamente de um produto químico, o açúcar actua através de processos químicos impedindo o normal desenvolvimento das reacções de hidratação do cimento. Govindasamy [28] afirma que o efeito do açúcar depende das quantidades utilizadas e da composição química do cimento. Se este for utilizado de uma forma adequada, mesmo uma pequena quantidade desta matéria – 0.05% da massa de cimento, pode retardar o tempo de cura.

Este efeito foi confirmado em betões expostos a diferentes condições de cura, verificando-se que com o aumento da temperatura e com o decréscimo da humidade relativa, o resultado não era tão evidente [29].

2.2.2. Propriedades mecânicas do material

Santos [18] refere que a diferença entre o módulo de elasticidade do betão existente e do betão adicionado condiciona a adesão das camadas.

A camada do novo betão deve apresentar um módulo de elasticidade igual ou superior relativamente ao do material do substrato [12].

A rigidez diferencial, devido à diferença entre módulos de elasticidade de camadas de betão de diferentes idades, é geralmente desprezada. Este facto influencia significativamente o comportamento da interface pois pode criar tensões adicionais na mesma [12]. A resistência ao corte da interface demonstra um acréscimo consoante o aumento da classe de resistência do betão adicionado, ou seja, com o aumento da rigidez diferencial foram obtidos maiores valores da tensão normal da interface [30].

A retracção diferencial faz com que seja inevitável a geração de tensões de corte na interface entre um substrato de betão e uma nova camada de betão [30]. No entanto concluiu-se [12] que o aumento da diferença de idades entre as camadas de betão pode conduzir também a um aumento da resistência ao corte da interface em determinadas condições específicas.

Tanto a rigidez como a retracção diferencial aqui descritas foram avaliadas para ensaios específicos, sendo concluído por Júlio [30] que apesar da retracção diferencial ter um papel inquestionável na resistência ao corte, cada caso de estudo apresenta as suas particularidades, podendo estes resultados não ser verificados em estudos diferentes.

2.2.3. Teor de humidade do substrato

Júlio [31] admite que a influência da humidade do substrato na resistência ao corte da interface betão-betão não é uma matéria de consenso, contudo pode afirmar-se que: a) um substrato seco pode absorver demasiada água da nova camada de betão, resultando retracção excessiva da mesma e em fraca adesão; b) um substrato saturado com a superfície molhada pode dificultar a adesão entre a camada de betão existente e a nova camada de betão; e por último c) a existência de um substrato saturado mas com a

superfície seca corresponderia à melhor condição de humidade, resultando na melhor hipótese de adesão (Figura 13):

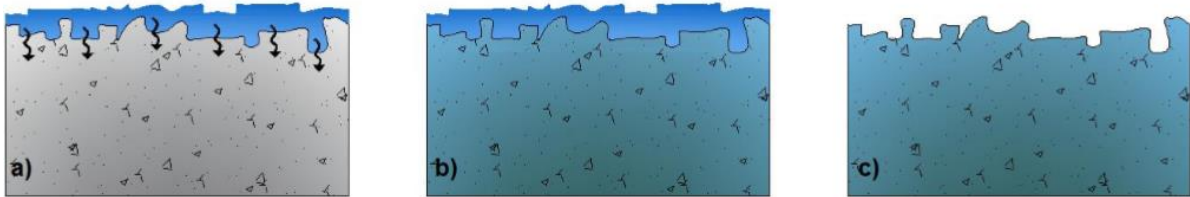


Figura 13- Humidade do substrato: a) substrato seco; b) substrato saturado com superfície molhada; c) substrato com superfície seca

2.2.4. Temperatura

A temperatura do substrato no momento em que recebe o betão de reparação mostra ter um efeito significativo no aumento da resistência da ligação ao corte. Os substratos mais frios (4°C) resultam em baixas resistências de ligações iniciais mas elevadas resistências de ligação a longo prazo comparados com substratos com elevada temperatura (38°C). Este efeito deve-se provavelmente ao efeito da temperatura na hidratação da pasta de cimento. Baixas temperaturas geralmente baixam a velocidade de hidratação. As baixas velocidades de hidratação permitem que os produtos hidratantes tenham tempo suficiente para se difundirem uniformemente pela pasta de cimento, aumentando a resistência em idades elevadas [9].

2.2.5. Condições de cura

As condições de cura são afectadas pelos factores ambientais, como a humidade e a temperatura a que o betão está sujeito. Santos [18] refere que para a cura ser adequada deve ser iniciada logo após a colocação do betão e deve ocorrer pelo menos durante 3 a 7 dias. Uma correcta cura permite que as tensões máximas que se originam entre o betão existente e a nova camada ocorram depois do betão mais recente apresentar resistência suficiente para as suportar. Diminui-se também o risco de fissuração devida à retracção diferencial entre as diferentes camadas.

Santos e Júlio [22] realizaram um estudo experimental onde foram consideradas duas condições de cura. Um conjunto de amostras foi desenvolvido em laboratório, sujeito às condições normais de trabalho, e outro exposto às condições ambientais no exterior do laboratório (Figura 14).

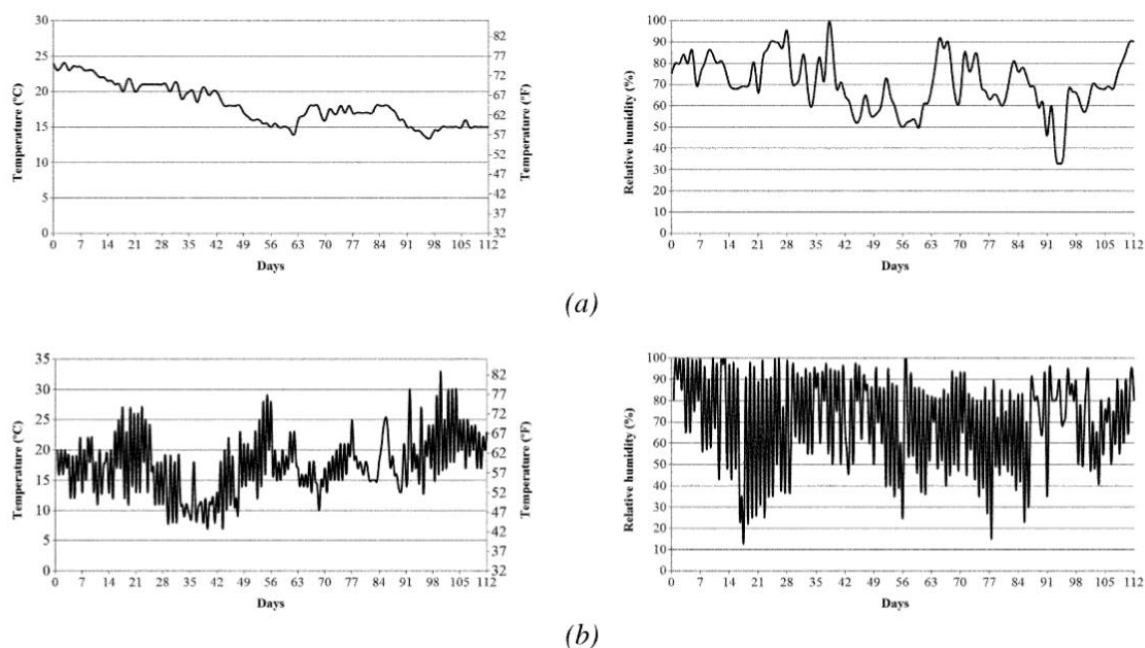


Figura 14- Temperatura e humidade relativa: a) no interior do laboratório; b) no exterior do laboratório[22]

Os autores concluíram que os resultados obtidos para as diferentes condições foram consideravelmente diferentes, principalmente devido às flutuações de humidade relativa e temperatura.

2.2.6. Fissuração

Como foi já referido, a rugosidade é um parâmetro muito importante na ligação de interfaces betão-betão, contudo alguns dos métodos como a utilização de martelo pneumático ou de agulhas para obter uma superfície rugosa podem levar à fissuração do substrato. Deste modo, estes procedimentos devem ser evitados dando preferência à utilização de jacto de água ou de areia. A integridade do substrato deve ser preservada tendo em conta que a aderência entre camadas de betão fica fragilizada na presença de fissuração [21].

2.2.7. Agentes de ligação

Os agentes de ligação são recomendados para melhorar a ligação entre um betão já existente e uma nova camada de betão. Existem dois tipos de mecanismos de ligação [32]: ligação física através de coesão e adesão química através da reacção com a superfície. Os agentes mais utilizados na construção são os adesivos à base de resina epóxi, existindo outros tipos como argamassas e emulsões. Os agentes de ligação comerciais são adequados para melhorar a ligação entre duas camadas de betão endurecido mas menos eficientes na

ligação de betão fresco a betão endurecido. A aplicação destes materiais não melhora a resistência da ligação betão-betão desde que se adopte previamente um método de preparação da superfície que aumente a rugosidade [33].

Santos [18] refere que a contribuição dos agentes de ligação é uma matéria ainda não conclusiva pois existem estudos que remetem para conclusões divergentes.

2.2.8. Estado de tensão na interface

Podem considerar-se três estados de tensão na interface relacionados com tracção, compressão e corte, ocorrendo, em geral, uma combinação dos anteriores. Consideram-se seis possíveis tipos de rotura (Figura 15) [18]:

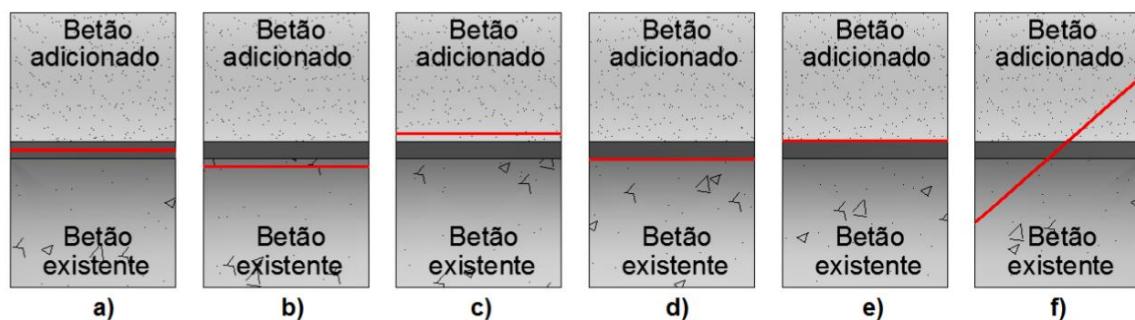


Figura 15- Tipos de rotura: a) no agente de ligação; b) no betão de substrato; c) no betão adicionado; d) na interface entre o agente de ligação e o betão de substrato; e) na interface entre o agente de ligação e o betão adicionado; f) rotura mista

A avaliação da resistência da ligação em elementos compósitos pode ser feita através de ensaios que serão posteriormente mencionados no ponto 2.4. desta dissertação.

2.2.9. Fadiga

A fadiga ocorre devido à aplicação de ciclos de carga cuja magnitude é menor do que a carga de rotura [34].

Segundo o Eurocódigo 2 [19] a resistência das estruturas à fadiga deve ser verificada em casos especiais e efectuada para elementos estruturais sujeitos a ciclos de carga regulares. Relativamente ao esforço longitudinal nas juntas de betonagem em diferentes datas, sob acções dinâmicas ou que envolvam fadiga, esta norma [19] prevê que os coeficientes de atrito e coesão (abordados adiante na expressão (2.15)), indicados para cada superfície, devam ser reduzidos de metade.

O processo de fadiga envolve a deterioração progressiva e irreversível da estrutura e pode levar a deformações e fissuração excessivas. Pode ocorrer nas ligações o descolamento das armaduras internas em elementos de betão [34].

2.2.10. Existência de armadura cruzando a interface

2.2.10.1. Conectores

Os conectores são um caso particular de armadura que cruza a interface e são amplamente utilizados na indústria de betão pré-fabricado. Os conectores de aço são necessários para acomodar os movimentos localizados decorrentes, por exemplo de mudanças de volume de betão, ou de forças sísmicas [32]. São apresentados na Figura 16, alguns tipos de conectores:

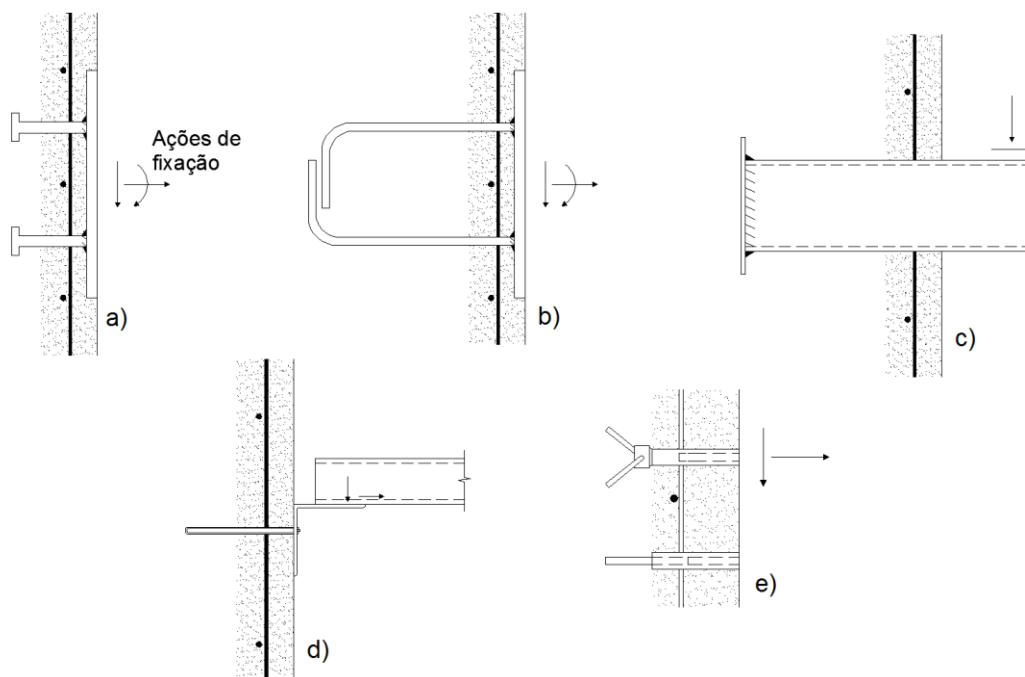


Figura 16- Tipos de conectores: a) Placa de solda ancorada com pregos de cabeça; b) Placa de solda ancorada por varões de reforço; c) Modelado na secção de aço; d) Conector com ângulo; e) Conectores inseridos no betão (adaptado de [32])

2.3. Evolução dos modelos teóricos de estimação da resistência ao corte longitudinal

Nas últimas décadas, vários autores têm vindo a estudar a resistência ao corte longitudinal da interface betão-betão, sendo de seguida apresentados os que mais se destacaram:

2.3.1. Anderson, 1960

O autor [35] foi um dos primeiros a propor uma expressão de cálculo para prever a resistência ao corte longitudinal em interfaces betão-betão [4,5]. A expressão foi definida empiricamente e é do seguinte tipo:

$$v_u = v_0 + k\rho \quad (2.2)$$

Onde v_u corresponde à resistência ao corte longitudinal na interface; v_0 e k são parâmetros determinados experimentalmente e ρ diz respeito à percentagem de armadura que atravessa a interface.

2.3.2. Birkeland e Birkeland, 1966

Birkeland e Birkeland [33] apresentam uma hipótese - “*Shear-friction theory*” (Figura 17), através de uma expressão em que o atrito é considerado de forma explícita, no entanto a coesão e o efeito de ferrolho não são incluídos:

$$v_u = \rho f_y \tan \phi = \rho f_y \mu \quad (2.3)$$

Onde v_u corresponde à resistência ao corte longitudinal na interface; ρ diz respeito à percentagem de armadura que atravessa a interface, f_y representa a tensão de cedência do aço e μ depende do ângulo de atrito interno da interface, sendo este parâmetro designado por coeficiente de atrito.

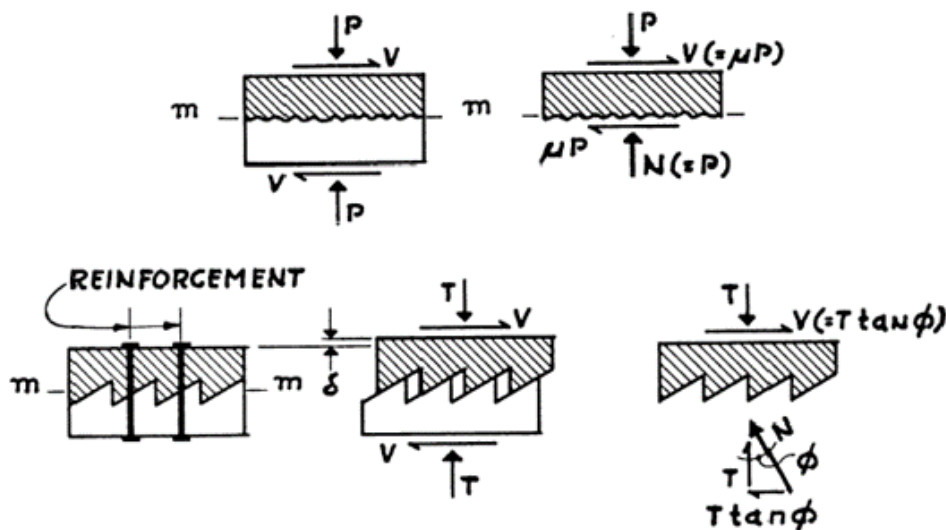


Figura 17- "Shear-friction theory"[33]

2.3.3. Mattock e Hawkins, 1972

Os autores [36] propõem uma modificação (Figura 18) à expressão de Birkeland e Birkeland [33], considerando já a coesão [31, 37]:

$$v_u = 1.38 + 0.8(\rho f_y + \sigma_n) [MPa] \quad (2.4)$$

Nesta expressão, conhecida como “*modified shear-friction theory*”, tal como na anterior, v_u corresponde à resistência ao corte longitudinal da interface, sendo que Mattock e Hawkins [36] atribuem à coesão um valor de 1.38MPa e assumem o coeficiente de atrito como constante e igual a 0.8. As tensões de compressão devidas às acções exteriores são consideradas através de σ_n .

2.3.4. Loov, 1978

O autor [38] foi o primeiro a considerar a resistência do betão, propondo a seguinte expressão [31, 37]:

$$\frac{v_u}{f_c} = k \sqrt{\frac{\rho f_y + \sigma_n}{f_c}} \quad (2.5)$$

Onde v_u corresponde à resistência ao corte longitudinal na interface; f_c diz respeito à resistência à compressão do betão, k é uma constante, ρ é a percentagem de armadura, f_y representa a tensão de cedência do aço e σ_n representa os esforços de compressão.

A constante k foi inicialmente sugerida pelo autor, tomando o valor de 0.5 para interfaces não fissuradas.

2.3.5. Walraven, Frénay e Pruijssers, 1987

Com objectivo de considerar a resistência do betão, os autores desenvolveram um estudo experimental, a partir do qual apresentaram uma função que considera interfaces fissuradas [31, 37]:

$$v_u = C_1 (\rho f_y)^{C_2} \quad (2.6)$$

Onde v_u corresponde à resistência ao corte longitudinal na interface; ρ é a percentagem de armadura, f_y representa a tensão de cedência do aço e f_c diz respeito à resistência de compressão do betão. Os parâmetros C_1 e C_2 são determinados através das seguintes expressões de acordo com unidades SI :

$$C_1 = 0.822 f_c^{0.406} \quad (2.7)$$

$$C_2 = 0.0353 f_c^{0.303} \quad (2.8)$$

2.3.6. Randl, 1997

Randl [39] contribui significativamente para a melhoria das expressões de cálculo relativas ao corte longitudinal em interfaces betão-betão. O autor apresenta uma expressão que inclui de forma explícita o contributo da coesão, do atrito e do efeito de ferrolho [31, 37]:

$$v_u = \tau_{coh} + \mu \sigma_n + \alpha \rho \sqrt{f_c f_y} \quad (2.9)$$

A primeira parcela, τ_{coh} – coesão – está relacionada com a contribuição do próprio inter-bloqueamento entre os agregados, a segunda parcela, $\mu \sigma_n$ – atrito – está relacionada com o deslocamento longitudinal que é influenciado pela rugosidade da superfície e por último, $\alpha \rho \sqrt{f_c f_y}$ – efeito de ferrolho – relaciona-se com a contribuição da resistência da armadura transversal que atravessa a interface. Nesta última parcela, α é o coeficiente que tem em conta o efeito de ferrolho e f_c a resistência à compressão do betão.

2.3.7. Santos e Júlio, 2009

Após vários estudos experimentais para avaliar a resistência de ligação entre camadas de betão de diferentes idades, os autores sugerem que os coeficientes de coesão e de atrito devem ser previstos tendo em conta a textura do substrato. São propostas duas expressões, a primeira (2.11) utiliza-se quando não existir armadura a atravessar a interface e a segunda (2.12) para o caso contrário [37]:

$$v_u = c_d f_{cd} \leq 0.25 f_{cd} \quad (2.10)$$

$$v_u = \mu_d (\sigma_n + \rho f_y) \leq 0.25 f_{cd} \quad (2.11)$$

Os parâmetros c_d e μ_d são determinados do seguinte modo:

$$c_d = \frac{1.062R_{vm}^{0.145}}{\gamma_{coh}} \quad (2.12)$$

$$\mu_d = \frac{1.366R_{vm}^{0.041}}{\gamma_{fr}} \quad (2.13)$$

Onde c_d e μ_d correspondem (em milímetros) aos coeficientes de coesão e de atrito respectivamente. R_{vm} é o valor médio da profundidade do perfil da superfície, γ_{coh} e γ_{fr} são factores de segurança. Santos e Júlio foram os primeiros a propor factores de segurança para os coeficientes de coesão e de atrito.

2.4. Expressões de dimensionamento

2.4.1. Eurocódigo2

A actual regulamentação europeia de projectos de estruturas de betão – Eurocódigo 2 [19], apresenta uma expressão de cálculo que não contempla alguns dos parâmetros condicionantes do comportamento da interface [31]. O valor de cálculo da tensão tangencial resistente na interface entre betões de diferentes idades é, então, dado por:

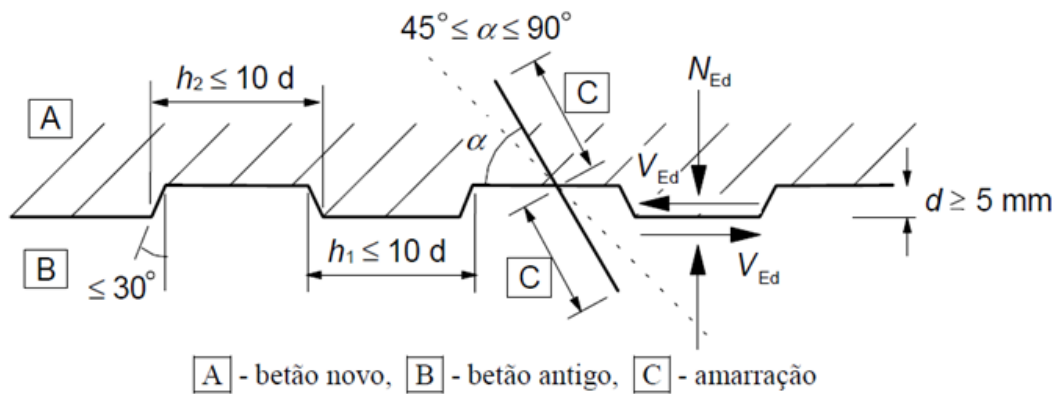
$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2.14)$$

Onde c e μ são coeficientes que dependem da rugosidade, f_{ctd} é o valor de cálculo da resistência do betão, σ_n corresponde à tensão devida ao esforço normal e ρ é a razão entre a área de secção das armaduras e a área da junta.

Os coeficientes c e μ são definidos consoante as características da superfície, que pode ser classificada como muito lisa, lisa, rugosa ou indentada. A Tabela 2 reflecte os valores recomendados para estes coeficientes segundo o Eurocódigo 2:

Tabela 2- Valores recomendados para os coeficientes c e μ [19]

Classificação da superfície	Características	c	μ
Muito Lisa	Superfície moldada por aço, plástico ou moldes de madeira especialmente preparados	0.025 a 0.10	0.5
Lisa	Superfície extrudida ou executada com moles deslizantes, ou executada com cofragem e não tratada após vibração	0.20	0.7
Rugosa	Superfície com rugosidade de pelo menos 3 mm de altura e espaçadas cerca de 40 mm, obtidas por meio de raspagem, de jacto de água, ar ou areia ou por meio de quaisquer outros métodos de que resulte um comportamento equivalente	0.40	0.7
Indentada	Superfície com recortes (Figura 18)	0.50	0.9


Figura 18 - Junta de construção indentada [19]

Observa-se assim que para $\alpha = 90^\circ$ a expressão considera o efeito da coesão através do primeiro termo da expressão (2.14) e o atrito através dos restantes, não sendo considerado de forma explícita o efeito de ferrolho. Deste modo, o regulamento em questão considera, de facto, parâmetros como a rugosidade da superfície, a resistência do betão mais fraco (f_{cd}) e tensões de compressão e armadura. Contudo são ignorados aspectos como a integridade e humidade do substrato, agentes de ligação, rigidez e retracção diferencial, fluência e fadiga [31].

2.4.2. ACI-318

O regulamento americano para estruturas de betão - ACI318-14 [40] faz uma abordagem diferente do anteriormente descrito. São referidas expressões alusivas a casos específicos de ligações betão-betão aplicáveis a elementos cuja interface é atravessada por

armaduras, pois estas são sempre admitidas como necessárias. Deste modo a resistência ao corte V_n é dada pela expressão (2.16) quando a armadura é perpendicular ao plano de corte:

$$V_n = A_{vf} f_y \mu \quad (2.15)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito estabelecido de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3- Valores recomendados para os coeficientes	
Tipo de superfície	Coeficiente de atrito μ
Betão colocado de forma monolítica	1.4λ
Betão colocado contra um substrato de betão endurecido com a superfície deixada intencionalmente rugosa	1.0λ
Betão colocado contra um substrato de betão endurecido com rugosidade não intencional	0.6λ
Betão ancorado a estrutura metálica com utilização de conectores	0.7λ

Onde $\lambda=1$ para betão corrente e 0.75 para betões leves. Por outro lado, λ deve ser determinado com base em proporções volumétricas dos agregados não excedendo 0.85 .

Sempre que a armadura apresente um inclinação (Figura 20) relativamente ao plano de corte, a resistência V_n será dada por:

$$V_n = A_{vf} f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2.16)$$

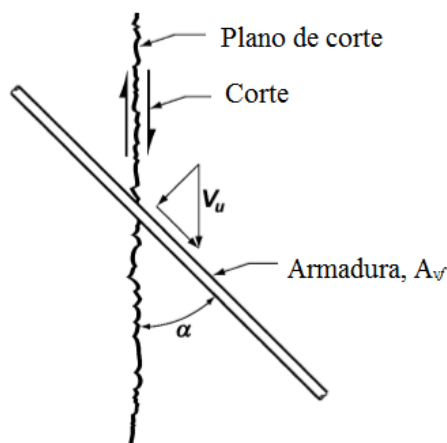


Figura 19– Armadura que atravessa o plano de corte(adaptado de [40])

Ao basear-se no “*modified shear-friction theory*” de Mattock [36], os termos $(A_{vf}f_y/A_c)$ ou $(A_{vf}f_y \sin\alpha/A_c)$ não devem ser menores que 1.4MPa .

2.4.3. Model Code 2010

O Model Code 2010 [11] refere que os parâmetros decisivos que influenciam a capacidade de carga são: a rugosidade da interface; a limpeza da superfície; a resistência e a qualidade do betão; a direcção da força de corte; a resistência da ligação / fissuração existente e a percentagem de armadura que atravessa a interface.

As principais contribuições para a resistência ao corte resultam dos seguintes mecanismos: inter-bloqueamento mecânico e adesão; atrito e "efeito de ferrolho". Se não existir presença de armadura na interface, o comportamento da mesma é bastante frágil e, tipicamente, a rotura ocorre com a perda da adesão e do inter-bloqueamento mecânico, sendo que, dependendo da sua percentagem, a presença de armadura na interface reflecte um comportamento mais dúctil.

A resistência de uma interface sujeita a forças de corte pode ser aproximada pela sobreposição de cada mecanismo de transferência de esforços. Como estes mecanismos interagem conjuntamente entre si e atingem as suas contribuições máximas para diferentes deslocamentos relativos, não é possível considerar os valores máximos de todos.

A resistência ao corte τ_u na interface é, assim, dada por:

$$\tau_u = \tau_a + \mu \cdot (\rho \cdot \kappa_1 \cdot f_y + \sigma_n) + \kappa_2 \cdot \rho \sqrt{f_y \cdot f_{cc}} \quad (2.17)$$

Em que a primeira parcela - τ_a é a resistência devido à adesão e ao inter-bloqueamento, a segunda parcela diz respeito ao contributo do atrito e a terceira parcela ao "efeito de ferrolho".

μ determina-se consoante a rugosidade da interface através da seguinte tabela:

Tabela 4- Coeficientes de atrito[11]

Rugosidade	Coeficiente de atrito μ
Interface lisa	0.5 – 0.7
Interface rugosa	0.7 – 1.0
Interface muito rugosa	1.0 – 1.4

ρ é a percentagem de armadura que atravessa a interface ($\rho = A_s/A_c$);

κ_1 e κ_2 são coeficientes de interacção relativos à força de tracção das armaduras e à resistência à flexão, respectivamente. $\kappa_1 = 0.5$ para superfícies muito rugosas, rugosas e

lisas, sendo nulo para superfícies muito lisas, enquanto que κ_2 diminui com o aumento da rugosidade variando entre 0.9 para superfícies muito rugosas e 1.5 para superfícies muito lisas;

σ_n é o esforço de compressão resultante de uma força normal a actuar na interface.

2.5. Ensaios de avaliação da resistência ao corte

Muitos ensaios têm sido desenvolvidos no sentido de avaliar a resistência da ligação de interfaces betão-betão. A Figura 21 mostra esquematicamente alguns ensaios associados a esse fim, onde se representa o sentido das forças aplicadas aos provetes e a distinção, a cores diferentes, dos betões de diferentes idades.

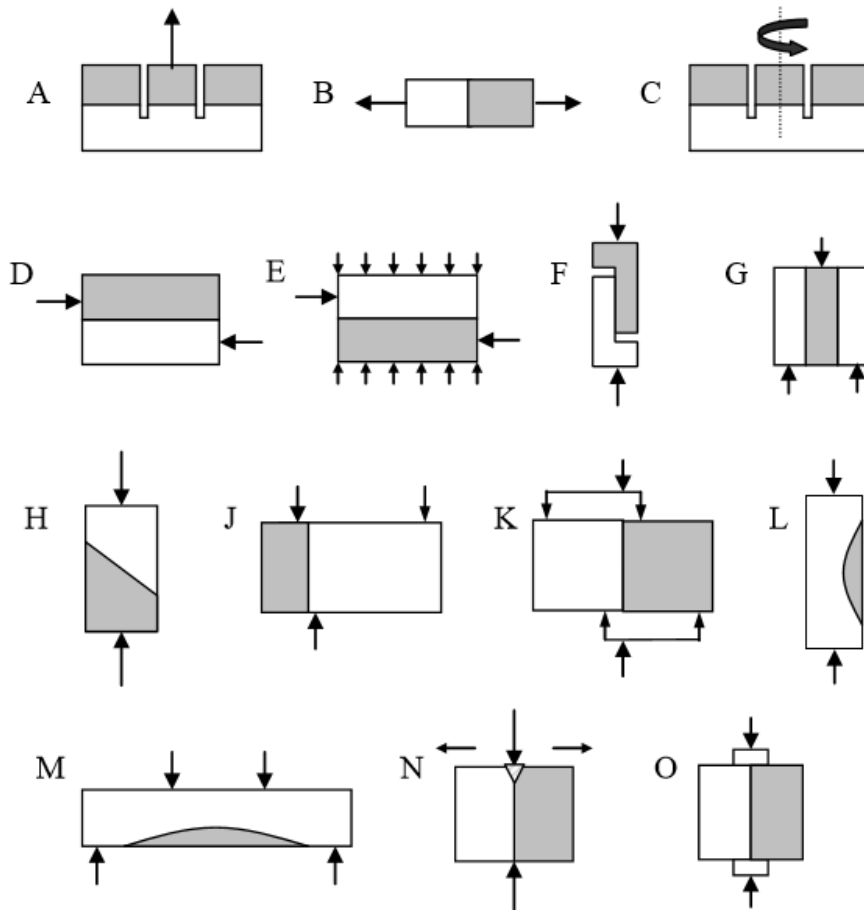


Figura 20- Ensaios de avaliação da resistência da ligação de interfaces betão-betão

[41]

Enquanto alguns destes métodos não são muito comuns, Bakhsh [41] afirma que outros como o “pull-off test” representado pela letra A ou o “slant shear test” representado pela letra H, são regularmente utilizados, sendo reconhecidos por uma grande parte dos regulamentos. O facto de apresentarem menos problemas e

imperfeições, a facilidade de concretização e uma grande variedade de aplicações, bem como a credibilidade de resultados são as principais razões para estes ensaios serem os mais admitidos. Os ensaios são divididos em cinco categorias baseadas no estado de tensão imposto à interface e o tipo de força aplicada no ensaio: ensaios de tracção directa; ensaios corte-compressão; ensaios de corte e de torção e ensaios de tracção indirecta.

Dado o contexto do presente estudo, é dado destaque aos ensaios de resistência ao corte, representados pelas letras D; E; F; G; J e K da Figura 20, em que nestes casos, as forças são aplicadas paralelamente à interface [41, 42].

Momayez [43] refere, ainda, um outro ensaio denominado “Bi-surface shear test” (Figura 21) muito semelhante ao representado pela letra G da Figura anterior, diferindo na existência de duas interfaces na primeira imagem, e de apenas a existência de uma interface no segundo caso.

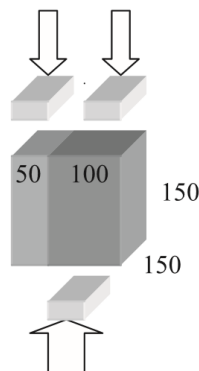


Figura21 - "Bi-surface shear test" [43]

3. Estudo Experimental

Traduzido num programa laboratorial que visa analisar a resistência ao corte longitudinal de diferentes interfaces betão-betão, o estudo experimental surge como um dos principais focos desta dissertação. O trabalho centrou-se num procedimento que consistiu em conferir diferentes rugosidades a superfícies de substratos de betão, aos quais foi posteriormente adicionada uma nova camada de betão na superfície tratada para esse efeito. Os provetes resultantes, de carácter compósito, foram testados numa prensa efectuando o ensaio “bi-surface shear test” abordado anteriormente no ponto 2.5, de modo a avaliar o comportamento das diferentes interfaces em estudo perante as forças de corte exercidas durante o mesmo.

Dando ênfase ao estudo de recursos alternativos à utilização de produtos químicos para tratamento de superfícies de betão, tomando assim por base o capítulo anterior na secção respeitante à preparação da superfície do substrato, o programa laboratorial em questão teve similarmente como intuito a observação do efeito do açúcar, doravante denominado de sacarose, como retardador de presa e a sua viabilidade comparado com outros métodos.

Foram realizados 25 ensaios resultantes de três fases antecessoras: 1) Primeira betonagem correspondente à concepção de substratos de betão e respectiva atribuição de diferentes rugosidades às suas superfícies através de métodos distintos; 2) Segunda betonagem correspondente à adição de uma nova camada de betão aos substratos já existentes; 3) Ensaio de compressão dos provetes com recurso a uma prensa.

Foram ainda betonados 5 provetes para referência e controlo de resistência em cada betonagem efectuada, ou seja, nas duas primeiras fases do programa laboratorial.

3.1. Planeamento e métodos do ensaio laboratorial

Todo o trabalho laboratorial inerente ao estudo das interfaces foi realizado no Laboratório de Estruturas e Betão Armado – LEBA, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria consoante a disponibilidade do espaço, bem como dos materiais necessários à execução dos modelos e dos respectivos ensaios. Perante as condições, então existentes, foi cumprida uma cronologia de procedimentos de acordo com o diagrama de Gantt apresentado na Figura 22:

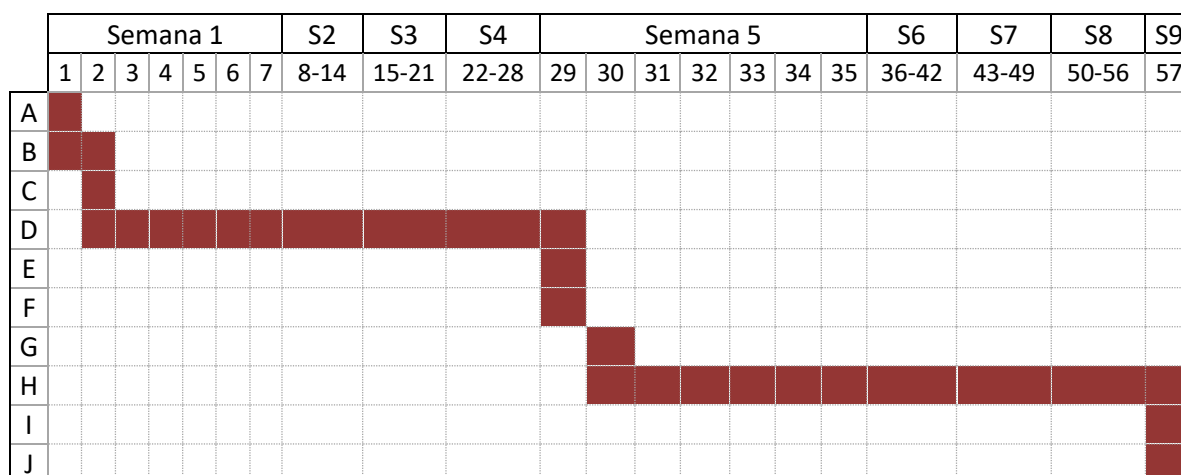


Figura 22-Diagrama de Gantt dos procedimentos laboratoriais efectuados

As tarefas correspondentes às letras representadas no diagrama anterior são descritas na Tabela 5 que é apresentada de seguida:

Tabela 5- Descrição dos procedimentos apresentados no diagrama de Gantt

Fase	Procedimento	Descrição
1	A	Primeira Betonagem – Elaboração de substratos
	B	Atribuição de rugosidade aos substratos
	C	Descofragem e armazenamento dos substratos
	D	Processo de cura dos substratos
2	E	Segunda Betonagem – Adição de uma nova camada de betão
	F	Ensaios à resistência do betão do substrato (28 dias)
	G	Descofragem e armazenamento dos provetes compósitos
	H	Processo de cura dos provetes compósitos
3	I	“ <i>Bi-surface shear test</i> ” dos provetes
	J	Ensaios à resistência do betão adicionado (28 dias)

Consideraram-se 5 métodos como base de estudo do tratamento das superfícies para a análise da resistência ao corte das respectivas interfaces betão-betão, realizando-se para isso 25 provetes cúbicos, 5 para cada tratamento de interface de modo a ser possível formar uma média (Tabela 6).

Tabela 6- Provetes realizados

	Tratamento de superfície	Quantidade de provetes
Substratos	Sem tratamento	5
	Raspado Manual	5
	Retardador de Presa 1	5
	Retardador de Presa 2	5
	Solução de Sacarose	5

A primeira fase, correspondente à elaboração dos substratos de betão, foi materializada através de uma primeira betonagem onde foram utilizados moldes metálicos

cúbicos de 150mm de aresta. Nesta primeira etapa pretendem-se substratos com a dimensão de $0.15 \times 0.15 \times 0.10 \text{ m}^3$. Para tal recorreu-se a placas de poliestireno de $0.15 \times 0.15 \times 0.05 \text{ m}^3$ que foram colocadas na base da cofragem de forma a obter 2/3 do provete como sugere a Figura 23. Posteriormente foram conferidas rugosidades nas superfícies dos substratos recorrendo aos tratamentos já referidos.

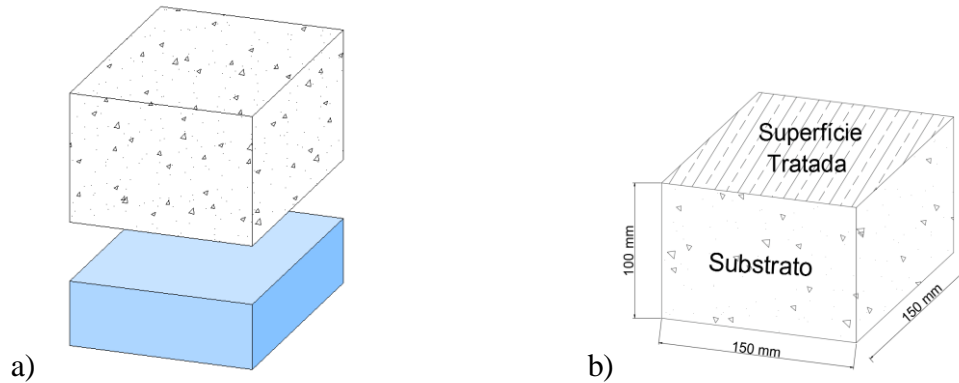


Figura 23- Esquemas representativos: a) Betonagem do substrato de betão; b) Configuração final do substrato

A segunda fase, sucedida após 28 dias da elaboração dos substratos, diz respeito à betonagem directamente sobre as superfícies tratadas, com dimensões correspondentes a 1/3 da cofragem, de modo a obter provetes de $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ conforme demonstra a Figura 24.

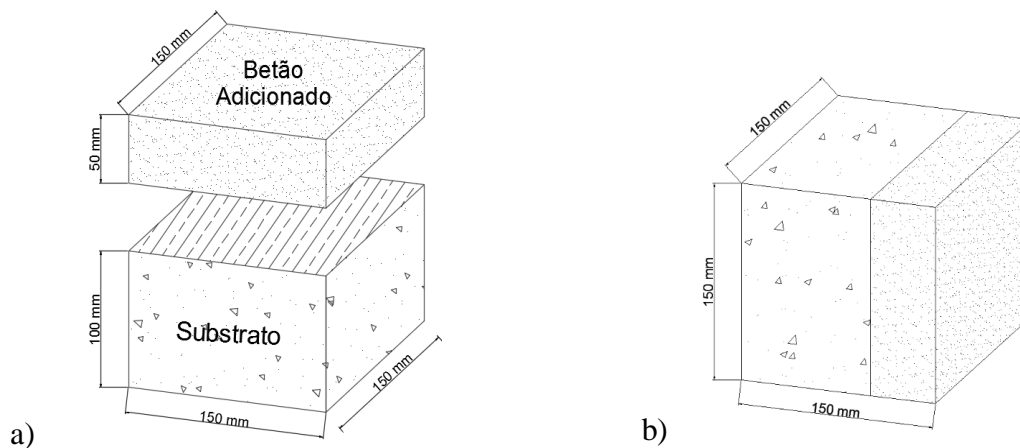


Figura 24- Exemplo dos provetes a ensaiar: a) Esquema representativo da segunda betonagem; b) Configuração final dos provetes a ensaiar

Atingida a resistência máxima do betão adicionado, procedeu-se à terceira fase que corresponde ao ensaio final, ou seja, os provetes foram ensaiados na prensa recorrendo a 3 barras metálicas que transferiram a força exercida para pontos estratégicos concretizando o “bi-surface shear test” segundo o esquema que se segue:

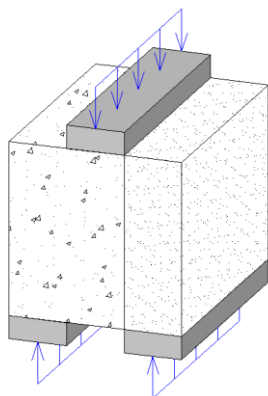


Figura 25- Esquema representativo do "bi-surface shear test" realizado

3.2. Materiais

3.2.1. Betão

Para as duas betonagens necessárias à realização dos provetes foi produzido um betão C30/37, empregando na sua composição cimento Portland, três agregados de diferentes granulometrias, água e um adjuvante superplastificante.

Para a determinação da composição de um betão de granulometria óptima, foi feita uma análise granulométrica dos agregados existentes, nomeadamente brita grossa 12/25; brita fina 8/12 e areia laranja, de acordo com a norma NP-1379 [44], sendo previstas as características descritas na Tabela 7:

Tabela 7– Características previstas

Máxima dimensão do agregado D _{máx} [mm]	Volume de vazios previsto [l]	Compacidade prevista
19	20	0.840

As curvas granulométricas resultantes destes constituintes apresentam-se na Figura 26, determinadas segundo o método de Faury, onde se verifica a aproximação da curva da mistura real à curva da mistura de referência.

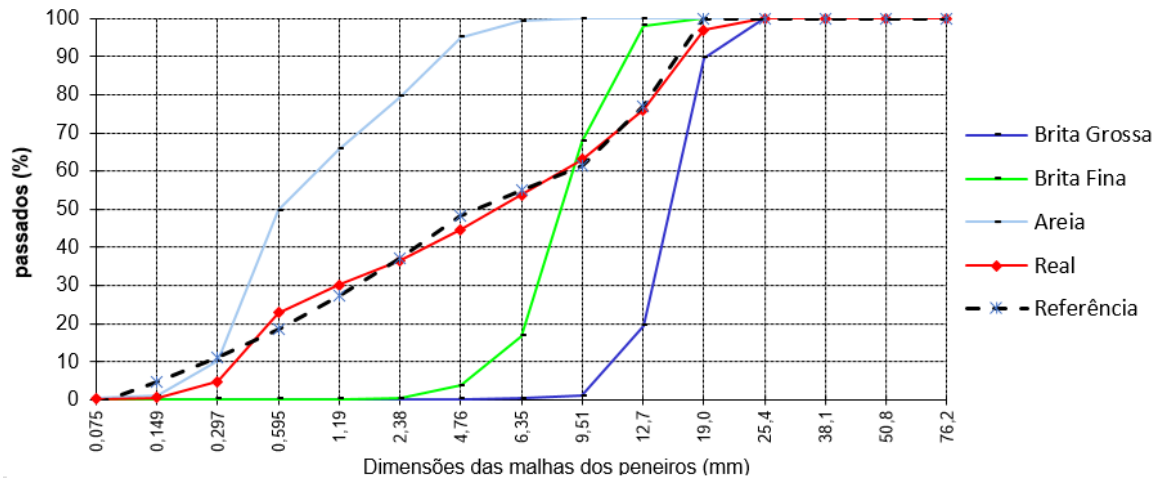


Figura 26 - Curvas granulométricas

Perante a mistura encontrada, o betão foi produzido numa betoneira de eixo vertical (Figura 28), cuja composição para os dois momentos de betonagem, foi feita tendo em consideração as quantidades necessárias nas duas fases de produção e em concordância com o apresentado nas tabelas 7 e 8.

Tabela 8- Determinação do volume de betão necessário

	1ª Betonagem		2ª Betonagem	
	Provetes (Referência)	Substratos	Provetes (Referência)	Betão Adicionado
Volume unitário[m ³]	0.15×0.15×0.15= 0.003375	0.15×0.15×0.10= 0.00225	0.15×0.15×0.15= 0.003375	0.15×0.15×0.05= 0.001125
Quantidades	5	25	5	25
Volume Conjunto[m ³]	0.016875	0.05625	0.016875	0.028125
Volume Total[m ³]	0.073125		0.0450	
Volume + 20% [m ³]	0.08775		0.054	

Determinados os volumes necessários de betão para produção das amostras, pôde-se estabelecer as quantidades de cada constituinte, tendo sido previsto um acréscimo de 20% do volume total que corresponde ao desperdício.

Tabela 9- Composição do Betão

Designação dos Constituintes		Quantidades		
		1 m ³	1 ^a Betonagem 0.0878 m ³	2 ^a Betonagem 0.054 m ³
Agregado 1 [kg]	Brita Grossa	568.27	49.87	30.69
Agregado 2 [kg]	Brita Fina	487.35	42.76	26.32
Agregado 3 [kg]	Areia Laranja	839.79	73.69	45.35
Cimento [kg]	Tipo II Classe 32.5N	360	31.59	19.44
Adjuvante [kg]	Viscocrete 20 HE	3.591	0.315	0.194
	Água [l]	136.675	11.993	7.380



Figura 27- Componentes do Betão



Figura 28- Betoneira utilizada

3.2.2. Retardadores de Presa

3.2.2.1. Soluções comerciais

Foram utilizadas duas soluções comerciais, cujas fichas técnicas se encontram em Anexo, no tratamento das superfícies dos substratos sendo uma delas fornecida pela Sika Portugal - Rugasol[®] 2 Líquido e outra pela Basf Portugal – Master Finish SRT 488.

Tabela 10- Rugasol 2 Líquido

Rugasol® 2 Líquido	Descrição	Retardador de presa de superfície para betão e argamassa pronto a aplicar que permite após lavagem o agregado à vista.
	Utilizações	Obtenção de betão lavado com excelente aspecto arquitectónico; Tratamento superficial de betão fresco em juntas de trabalho horizontais; Forma uma boa base de aderência para juntas de trabalho; Tratamento superficial de passeios e pedras artificiais que devem apresentar um efeito visível e duradouro de betão lavado.
	Características	Retarda a superfície do betão ou argamassa numa profundidade consideravelmente uniforme; Evita trabalhos de picagem; Agregado à vista com acabamento uniforme; Aplicável em moldes de madeira, metálicos e outros.
	Aplicação	Aplicar sobre as faces da cofragem.

Tabela 11- Master Finish SRT 488 (Antes: Rheoface 488)

Master Finish 488	Descrição	Retardador de presa superficial para a produção de elementos horizontais com agregados à vista.
	Utilizações	Pavimentos com grande expressividade e qualidade estética.
	Características	Fácil aplicação mediante pulverização; Não confere coloração ao betão; Não tóxico ou inflamável; A profundidade da penetração é controlada através da dosagem.
	Aplicação	Aplica-se mediante pulverização a baixa pressão sobre a superfície de betão.

Para identificação dos substratos foram adoptadas designações com as terminologias “Retardador de Presa 1 (RP1)” e “Retardador de Presa 2 (RP2)” de forma aleatória, não sendo identificadas as marcas correspondentes.

3.2.2.2. Soluções de sacarose

Para escolher a solução de sacarose ideal realizou-se um estudo preliminar com caldas de cimento. Deste modo, uma das primeiras tarefas a executar foi determinar a concentração ideal da solução de sacarose que funcionaria como retardador de presa. Para tal, produziu-se uma calda de cimento com relação $A/C=0.4$ que foi distribuída por 7 pequenos moldes: 6 identificados com letras de “A” a “F” e o restante como a referência, ou seja, não se adicionou qualquer solução. Passadas 4h, as superfícies foram pulverizadas até perfazer cerca de um milímetro acima da calda com 6 diferentes soluções de sacarose

(2.5g/L; 5g/L; 7.5g/L; 10g/L; 12.5g/L e 15g/L) respectivamente como exemplifica a Figura 29.

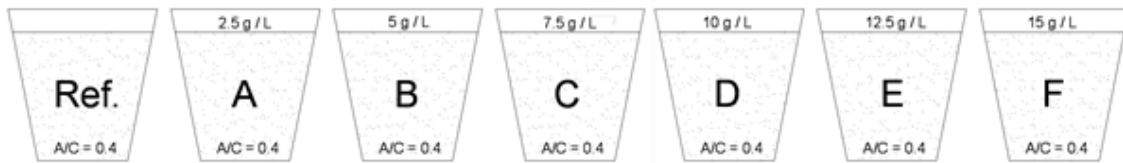


Figura 29- Esquema representativo da preparação para determinação da solução de sacarose a adoptar

Após 24h da aplicação das soluções, raspou-se a superfície de cada um dos provetes com um prego, de modo a observar a reacção da calda de cimento em contacto com as diferentes soluções de sacarose sobrepostas em cada um deles.



Figura 30- Conjunto de moldes com calda de cimento



Figura 31- Medição de quantidades de açúcar a utilizar



Figura 32- Aplicação das soluções de sacarose



Figura 33- Conjunto de amostras identificadas



Figura 34- Pormenor de superfície



Figura 35- Aspecto da calda após ser raspada

Como seria de esperar, a superfície de referência ofereceu resistência ao ser raspada, praticamente não sendo possível conferir rugosidade à mesma. Apresentando a solução A (2.5g/l) um comportamento semelhante ao descrito anteriormente foi ainda assim notória a menor robustez da face exposta perante o raspado manual. Comparativamente à superfície tratada com a solução anterior, a solução B permitiu facilidade ao raspar, não sendo a perfuração demasiadamente profunda. As restantes superfícies tratadas com as soluções C, D, E e F foram facilmente decompostas pelo prego revelando desta forma uma percentagem muito elevada de açúcar para a finalidade pretendida.

Analisadas, assim, as superfícies após serem raspadas, admitiu-se que a solução de sacarose a adoptar seria a de 5g/l ou seja, a solução B.

3.3. Realização dos provetes

3.3.1. Primeira Fase - Substratos

Tendo em conta que a primeira fase do programa laboratorial pressupõe a elaboração dos substratos que irão receber o betão adicionado, foi necessário recorrer a moldes metálicos dentro dos quais foram colocadas placas de poliestireno e revesti-los com óleo descofrante, sendo posteriormente preenchidos com betão.



Figura 36- Colocação das placas nos moldes metálicos



Figura 37- Confirmação das medidas previstas



Figura 38- Aplicação de óleo descofrante nas faces interiores



Figura 39- Enchimento dos moldes



Figura 40- Vibração do betão



Figura 41- Alisamento de superfícies

Assim que o endurecimento do betão se iniciou, começaram os processos de materialização das rugosidades das superfícies definidas para o programa experimental. Dividiram-se os moldes em grupos (Figura 42) sendo que num primeiro, as superfícies dos substratos não sofreram qualquer tipo de tratamento, permanecendo a sua face exposta inalterada após a betonagem e ligeiro alisamento. A um segundo grupo, foi conferida rugosidade raspando manualmente as superfícies com uma escova de arame (Figura 43). Aos três restantes grupos foram aplicados, nas superfícies, respectivamente: o retardador de presa 1, o retardador de presa 2 e a solução de sacarose adoptada com recurso a um borrifador. Nestes últimos casos, relativos à aplicação de substâncias que inibem o natural processo de endurecimento do betão, aguardou-se um dia para a actuação destas matérias na superfície em que foram aplicadas.



Figura 42- Substratos betonados

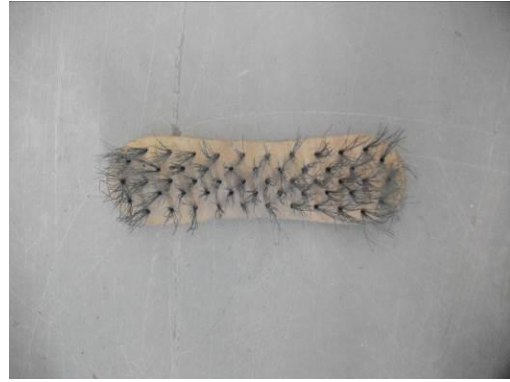


Figura 43- Escova de arame utilizada no raspado manual

No dia seguinte à betonagem, as amostras foram descofradas e foi concluído o procedimento de tratamento das superfícies dos três grupos com recurso dos retardadores de presa. Para tal recorreu-se a um jacto de água de modo a executar a decapagem das superfícies.



Figura 44- Substratos antes da decapagem das superfícies



Figura 45- Equipamento de pressão



Figura 46- Decapagem de superfícies com tratamento através de jacto de água



Figura 47- Pormenor do jacto de água



Figura 48- Substratos após decapagem das superfícies



Figura 49- Pormenor de uma superfície decapada

Todas as amostras foram colocadas no tanque (Figura50) ficando expostas a condições de cura controladas e durante 28 dias.



Figura 50-Tanque de cura

3.3.2. Segunda Fase – Adição de uma nova camada de betão ao substrato existente

Decorridos 28 dias desde a primeira betonagem, deu-se início à segunda etapa do programa laboratorial que prevê a “transformação” dos substratos paralelepípedos em provetes de 150mm de aresta através de uma nova betonagem aplicada verticalmente contra os substratos já existentes na superfície tratada para tal.

Os substratos foram retirados da água cerca de 2h antes da betonagem de modo a apresentarem a superfície seca mas, ainda assim, permanecerem saturados. As superfícies foram “sopradas” com ar comprimido para as limpar de pequenas partículas de forma à aderência do novo betão ser mais eficaz.

Os substratos foram, então, colocados novamente na cofragem cúbica, na posição inicial, e esta foi preenchida com betão fresco.



Figura 51- Superfície sem tratamento



Figura 52- Superfície Raspada. Manualmente



Figura 53- Superfície Retardador de Presa 1



Figura 54- Superfície Retardador de Presa 2



Figura 55- Superfície Solução Sacarose



Figura 56- Colocação de substratos na cofragem



Figura 57- Moldes antes da betonagem



Figura 58- Moldes após betonagem



Figura 59- Provetes composto desmoldado

No dia seguinte à adição da nova camada de betão, as amostras estavam finalizadas tendo sido desmoldadas (Figura 59) e novamente colocadas na câmara de cura.

3.4. Equipamentos e procedimentos

A terceira fase do estudo experimental incide no ensaio final dos provetes. Após o fabrico de todos os provetes e cumpridos os 28 dias de obtenção de máxima resistência

após a betonagem do betão adicionado aos substratos, estes foram retirados do tanque e posteriormente ensaiados à compressão numa prensa FORM+TEST - Mega 2-3000-100 D de 1999 (curso 50mm e capacidade 3000 kN) (Figura 60) com recurso ao *software* PROTEUS para registo dos valores obtidos.

A velocidade de carga aplicada às amostras cujos substratos foram tratados, ou seja, a todos os provetes compósitos, foi de 1kN/s como é definido na EN 12390-6 [45]. Os provetes para controlo de resistência foram ensaiados à compressão mediante o procedimento preconizado na norma EN 12390-3 [46] aos quais foi aplicada uma velocidade de carga de 10kN/s.

Os provetes foram colocados na prensa tendo atenção em colocar as superfícies mais lisas viradas para os pratos e nos casos de ensaio dos provetes compósitos, teve-se em consideração o correcto posicionamento das barras metálicas necessárias à concretização do ensaio seleccionado.



Figura 60- Equipamento utilizado



Figura 61- Software PROTEUS



Figura 62- Colocação de provetes na Prensa



Figura 63- Ajuste da colocação da barra metálica

4. Resultados Experimentais

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos em cada grupo de provetes em estudo através do ensaio “bi-surface shear test” realizado, bem como os resultados dos ensaios da resistência à compressão dos provetes de referência.

Assim, aos 28 dias após cada betonagem efectuada, foram registados os valores dos provetes produzidos para controlo de resistência. A Figura 64 expressa os resultados obtidos para o betão utilizado nos substratos e para o betão adicionado:

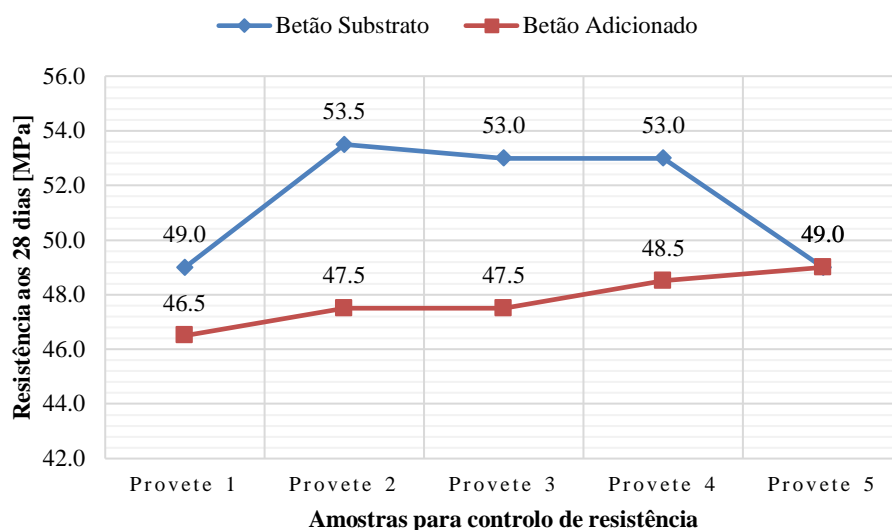


Figura 64- Resultados do ensaio à compressão dos provetes de referência para controlo da resistência

Verifica-se, que apesar de produzidos seguindo a mesma composição, o betão adicionado ao substrato revelou ser menos resistente que o produzido 28 dias antes. Na Tabela 12 são expostas as resistências médias destes betões.

Tabela 12 - Resistência Média dos provetes de referência	
Camada	Resistência Média aos 28 dias [MPa]
Betão do Substrato	51.5
Betão Adicionado	47.8

Será, também, apresentada uma tabela com os valores de cada ensaio, média de cada conjunto, desvio padrão e coeficiente de variação na secção correspondente à discussão de resultados.

4.1. Superfície sem tratamento (ST)

São referidos de seguida os resultados observados ao ensaiar os provetes compósitos cuja superfície não sofreu qualquer tratamento.

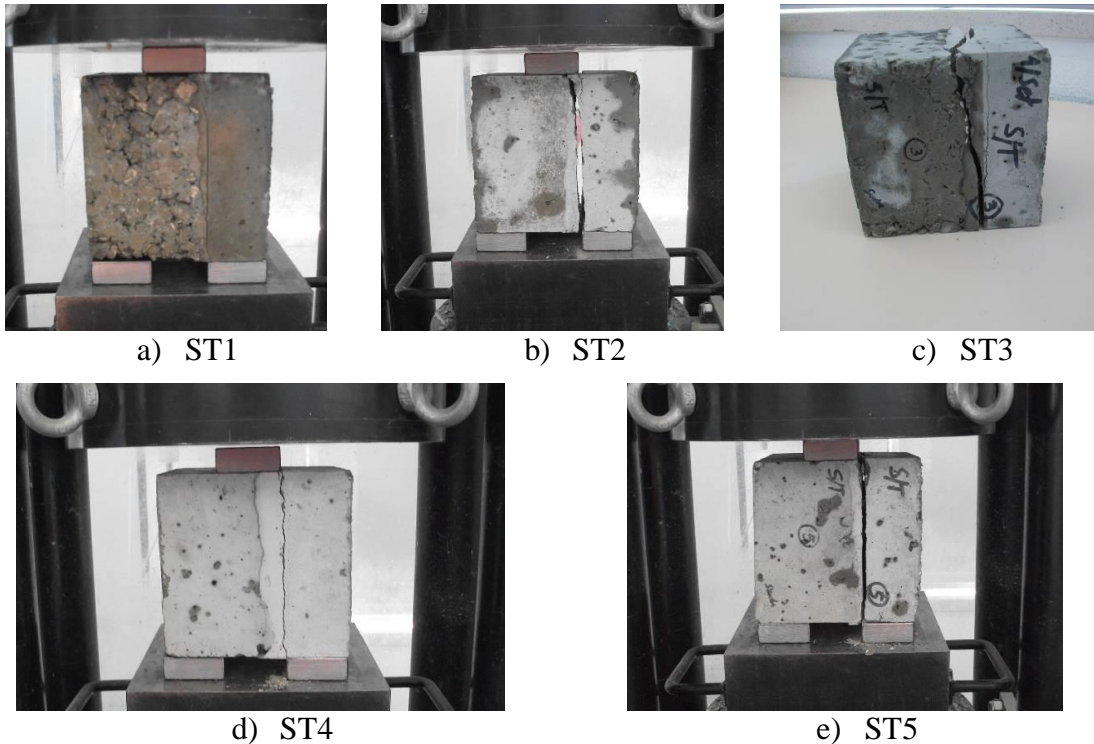


Figura 65- Ensaio dos provetes com interfaces sem tratamento (ST)

Verificou-se nas cinco amostras, sem tratamento de superfície, um comportamento muito semelhante entre as mesmas, com roturas adesivas em todos os provetes de ensaio, sendo que no terceiro provete - ST3, numa das faces, não visível durante o ensaio, a rotura deu-se também pelo betão do substrato como se pode observar na Figura 65-c). Os valores de rotura deste conjunto são apresentados na Figura 66:

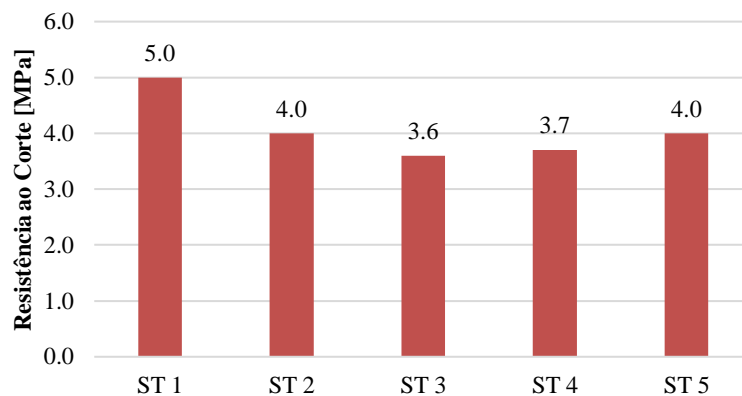


Figura 66- Resistências obtidas nas amostras sem tratamento

4.2. Superfície raspada manualmente (RM)

São expostos de seguida os resultados observados ao ensaiar os provetes cuja superfície foi raspada manualmente.

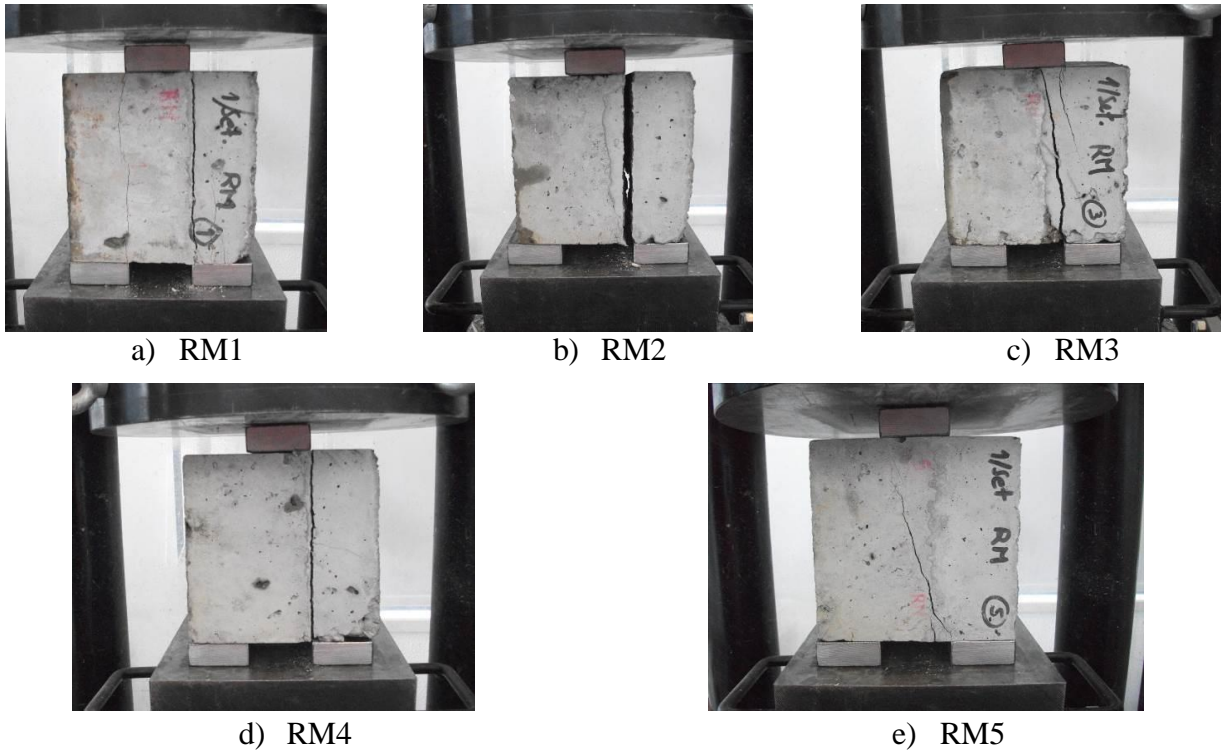


Figura 67- Ensaio dos provetes com interfaces raspadas manualmente

Com este tratamento foram obtidas três roturas adesivas (RM2, RM3 e RM4), uma rotura monolítica (RM1) e uma rotura coesiva, não esperada, que atravessa o betão do substrato (R5).

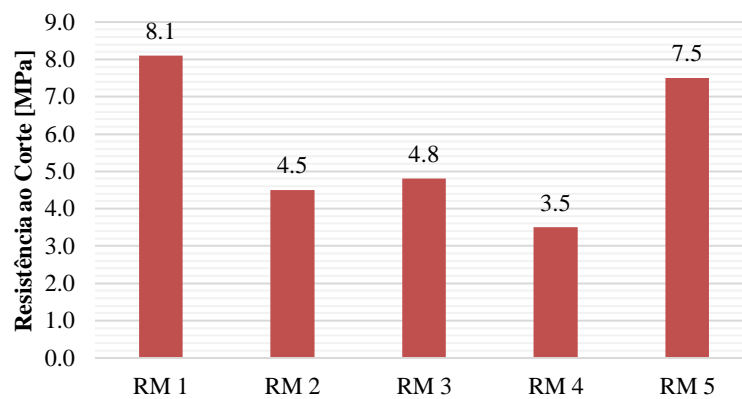


Figura 68- Resistências obtidas nas amostras tratadas com o raspado manual

Perante os resultados obtidos, verifica-se a ausência de coerência nos modos de rotura deste grupo de ensaio, pelo que não se poderão comparar os resultados de um modo global.

4.3. Superfície tratada com retardador de presa1 (RP1)

Os resultados observados ao ensaiar os provetes compósitos cuja superfície foi tratada com retardador de presa 1 são demonstrados pela Figura 67:

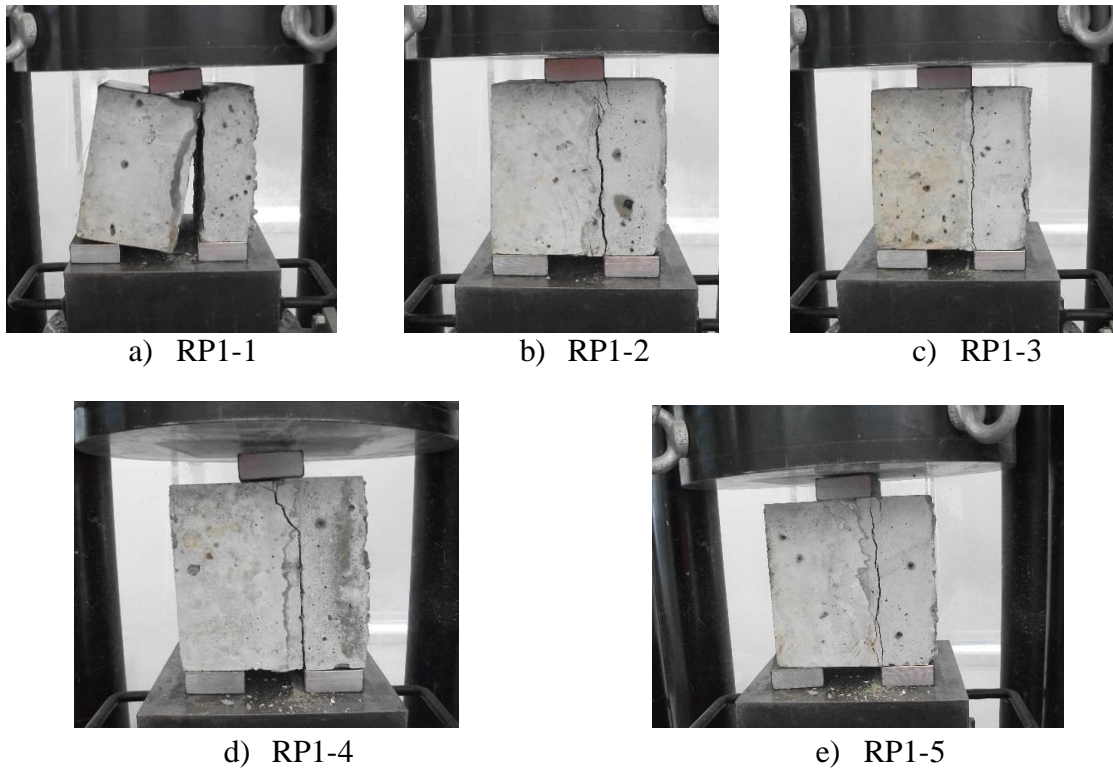


Figura 69- Ensaio dos cubos com interfaces tratadas com o Retardador de Presa 1 (RP1)

Foram verificadas através deste ensaio, roturas adesivas (pela interface) em todas as amostras, tal como acontecera para as superfícies sem tratamento, apresentando este método valores de rotura ligeiramente superiores como demonstra a Figura seguinte:

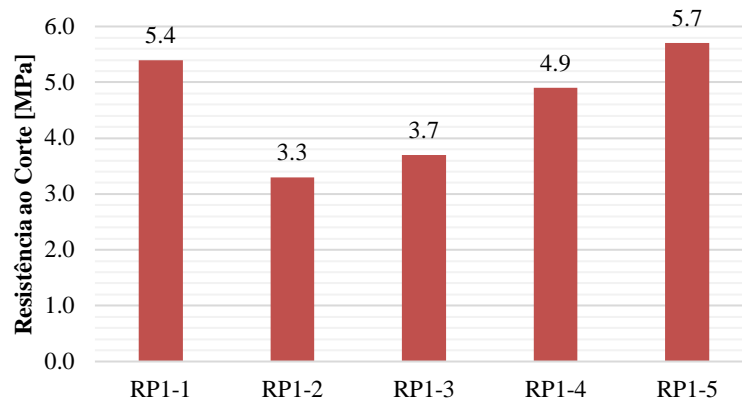
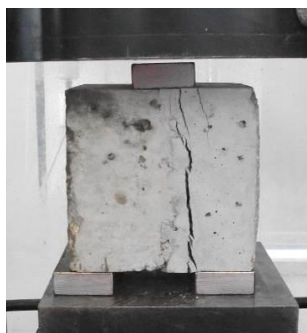


Figura 70- Resistências obtidas nas amostras tratadas com o Retardador de Presa 1

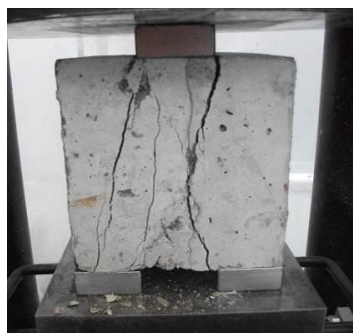
Apesar de pertencerem ao mesmo grupo de ensaio, os valores obtidos sustentam pouca coerência de resultados pois são consideravelmente discrepantes, não se encontrando uma linha de uniformidade para todos os provetes sujeitos ao mesmo tratamento. Foram também verificadas neste caso, cinco roturas adesivas, sendo que se observa no quarto provete um comportamento não congruente com os restantes ao apresentar uma rotura manifestamente adesiva mas verificando-se também o atravessamento da fissura pelo betão do substrato podendo ser considerada rotura coesiva, à semelhança do que aconteceu com o provete ST3.

4.4. Superfície tratada com retardador de 2 (RP2)

São expostos de seguida os resultados observados ao ensaiar os provetes de ensaio cuja superfície foi tratada com retardador de presa 2.



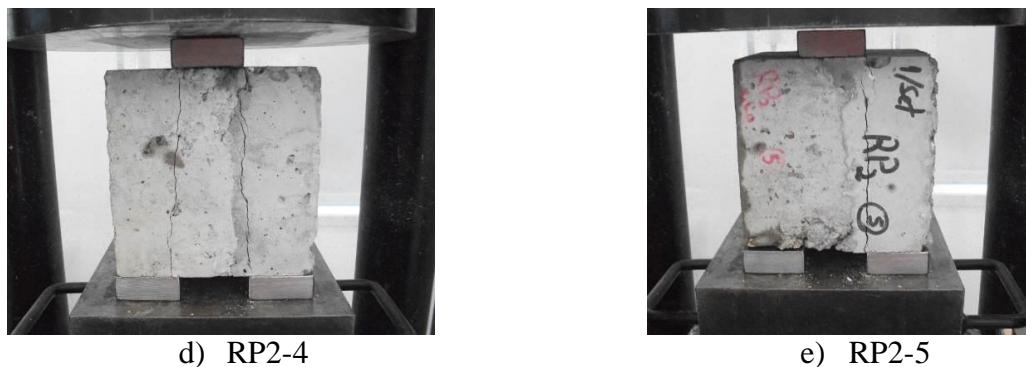
a) RP2-1



b) RP2-2



c) RP2-3



d) RP2-4
e) RP2-5
Figura 71- Ensaio dos provetes com interfaces tratadas com o Retardador de Presa 2 (RP2)

A Figura 71 retrata os resultados obtidos para os provetes com interfaces tratadas com o Retardador de Presa 2, sendo que a imagens, tal como em todos os ensaios, foram registadas imediatamente após a rotura do betão, verificando-se no provete RP2-1 (Figura 71-a))um deslocamento de uma das barras metálicas inferiores por meio da força exercida durante o ensaio. As superfícies tratadas com o RP2 revelaram três modos de rotura diferentes, observando-se três roturas adesivas (PR2-1, RP2-3 e PR2-5), um provete com rotura claramente monolítica (RP2-4) e um com rotura mista (RP2-2). São apresentados de seguida os valores da resistência para este tratamento de superfície.



Figura 72- Resistências obtidas nas amostras tratadas com o Retardador de Presa 2

Deste modo, não se pode, definir um padrão pois os resultados não se apresentam coesos.

4.5. Superfície tratada com Solução de Sacarose (SS)

São expostos de seguida os resultados observados ao ensaiar os provetes cuja superfície foi tratada com a solução de sacarose adoptada.

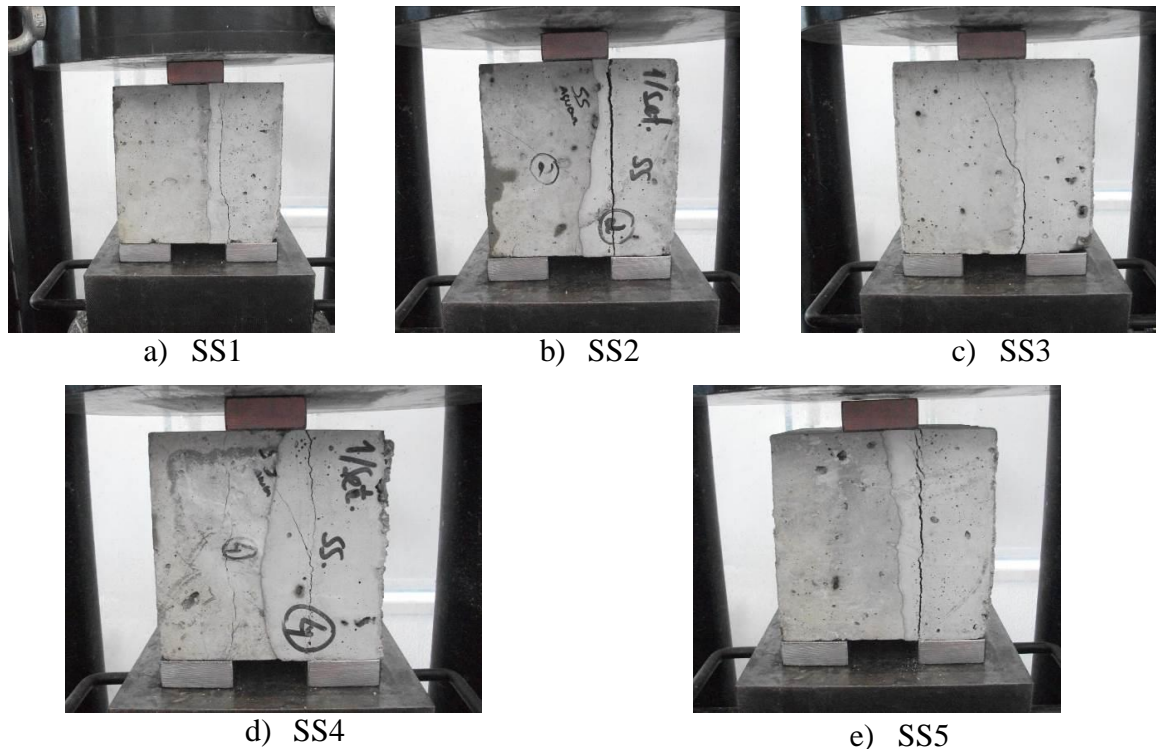


Figura 73- Ensaio dos provetes com interfaces tratadas com Solução de Sacarose (SS)

Os provetes SS1, SS2 e SS5 manifestaram uma rotura adesiva, o proveteSS3 uma rotura coesiva e o proveteSS4 uma rotura monolítica para os valores apresentados na Figura 74, através dos quais não se consegue estabelecer um padrão constante para este tratamento pois foram verificados valores de resistência ao corte entre os 3 e os 7 MPa.

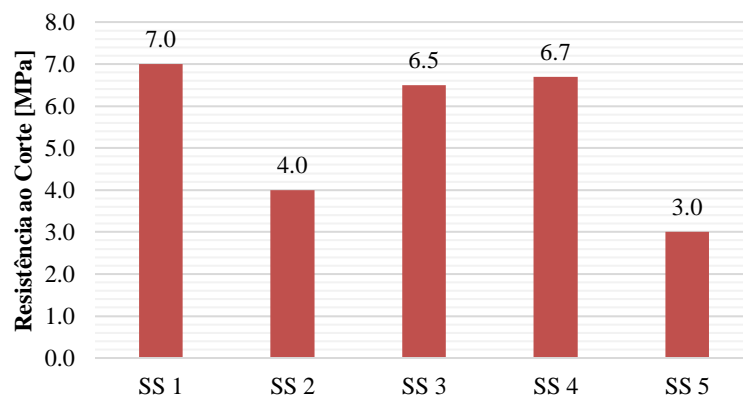


Figura 74- Resistências obtidas nas amostras tratadas com Solução de Sacarose

4.6. Discussão de Resultados

Perante os resultados observados pode fazer-se um resumo dos registos relacionados a cada grupo de provetes em estudo, sendo apresentados na seguinte tabela:

Tabela 13- Valores registados nos ensaios

Designação	Massa [kg]	Força de Rotura [kN]	Média [kN]	Modo de Rotura	DevioP adção [kN]	Coefficiente Variação [%]
ST 1	8,10	110,90		Adesiva		
ST 2	8,32	86,70		Adesiva		
ST 3	8,02	81,30	89,62	Adesiva	12,13	13,54
ST 4	8,35	82,60		Adesiva		
ST 5	8,35	86,60		Adesiva		
RM1	8,01	182,20		Monol.		
RM2	7,99	106,10		Adesiva		
RM3	8,05	106,50	128,32	Adesiva	45,3	35,30
RM4	8,33	77,10		Adesiva		
RM5	7,99	169,70		Coesiva		
RP1-1	7,99	122,10		Adesiva		
RP1-2	8,22	72,80		Adesiva		
RP1-3	8,03	82,20	99,26	Adesiva	20,79	20,95
RP1-4	8,38	110,70		Coesiva		
RP1-5	8,10	108,50		Adesiva		
RP2-1	8,06	127,50		Adesiva		
RP2-2	8,19	182,20		Mista		
RP2-3	7,90	116,30	148,9	Adesiva	32,05	21,52
RP2-4	8,15	134,10		Monol.		
RP2-5	7,93	184,40		Adesiva		
SS1	8,01	154,50		Adesiva		
SS2	7,99	93,40		Adesiva		
SS3	8,05	150,90	120,82	Coesiva	40,07	33,17
SS4	8,33	141,20		Monol.		
SS5	7,99	64,10		Adesiva		

Apresentam-se de seguida na Figura 75 as resistências médias obtidas com os dados os ensaios.

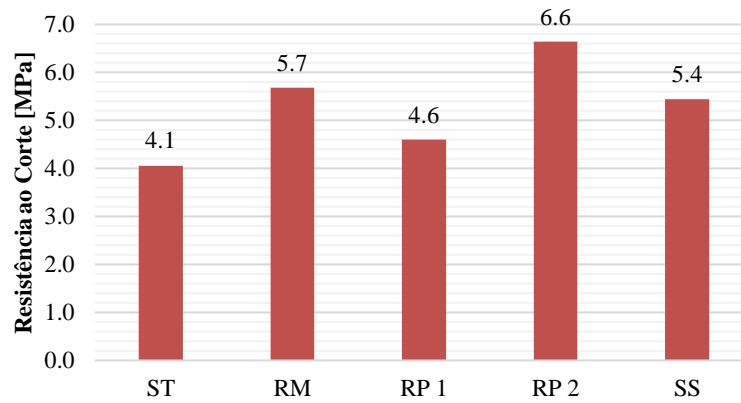


Figura 75- Resistências médias registradas

É notório, como esperado, que a superfície menos eficiente no que toca à resistência ao corte fosse a que não foi submetida a tratamentos de atribuição de rugosidade e em oposição, o retardador de presa comercial denominado RP2 foi o que apresentou melhores resultados de resistência na ligação da interface.

Foram verificadas, durante os ensaios, algumas roturas à partida não previsíveis. Dá-se assim, destaque aos provetes ST3; RM5; RP1-4; RP2-2 e SS3.

Verificou-se, portanto, no 3º provete sem tratamento e no 4º provete tratado com o RP1 uma rotura coesiva que mantém características adesivas mas com fissura pelo betão do substrato (em detalhe na Figura 76) que não coincidem com as restantes roturas dos provetes dos mesmos grupos de tratamento.



Figura 76- Rotura não esperada nos provetes: a) ST3 e b) RP1-4

O provete composto denominado RP2-2 apresenta uma rotura considerada mista, demonstrando variadas fissuras pelo betão do substrato (Figura 77).

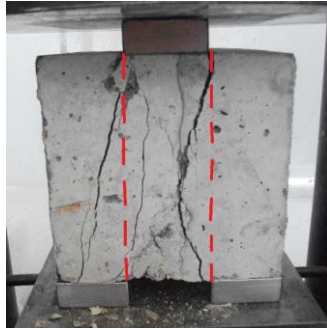


Figura 77- Rotura do provete RP2-2

O 5º substrato cuja superfície foi raspada manualmente apresentou também uma rotura inesperada.

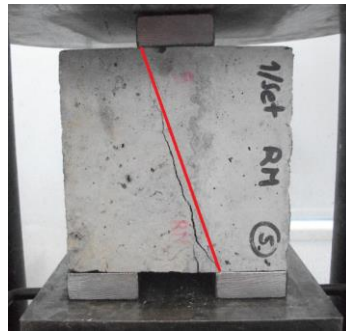
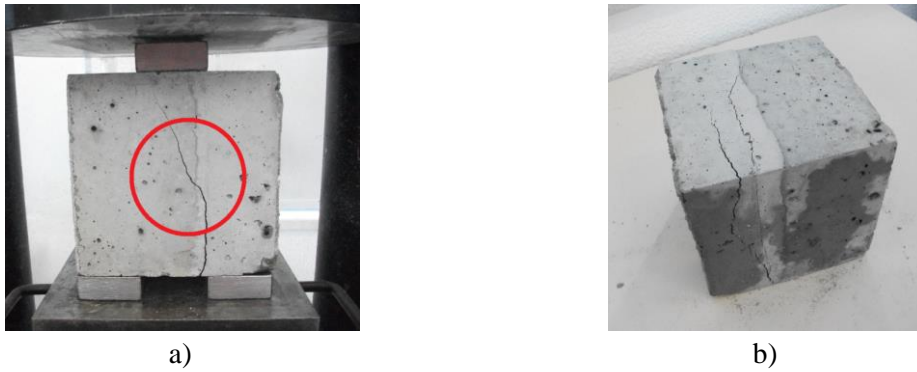


Figura 78- Rotura do provete RM5

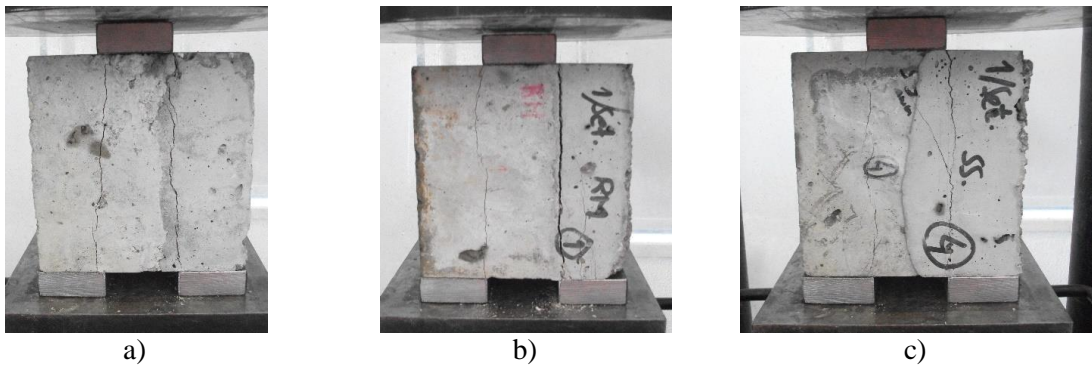
Esta rotura estabelece uma fissura oblíqua desde um ponto da interface ao ponto onde incide a barra metálica que transfere a força da prensa para o provete.

O provete SS3, manifestou também uma rotura inesperada. A fissura é desenvolvida pela interface entre as duas camadas de betão até um certo ponto, onde passa também a atravessar o betão do substrato. No entanto, uma vista pelas restantes faces do provete revela ser o único que apresentou fissuração pelo betão adicionado, como se verifica na Figura 79:



a) b)
Figura 79 - Rotura do provete SS3: a) rotura pela interface e pelo betão de substrato; b) rotura pelo betão adicionado

Por último pode dar-se relevância aos provetes cuja rotura manifestada foi monolítica ou coesiva.



a) b) c)
Figura 80- Roturas monolíticas verificadas: a) PR2-2; b) RM1; c) SS4

Resumem-se na Figura 81, os modos de rotura verificados para casa grupo de estudo, verificando-se que a rotura pela interface, foi a mais observada em qualquer um dos conjuntos ensaiados:

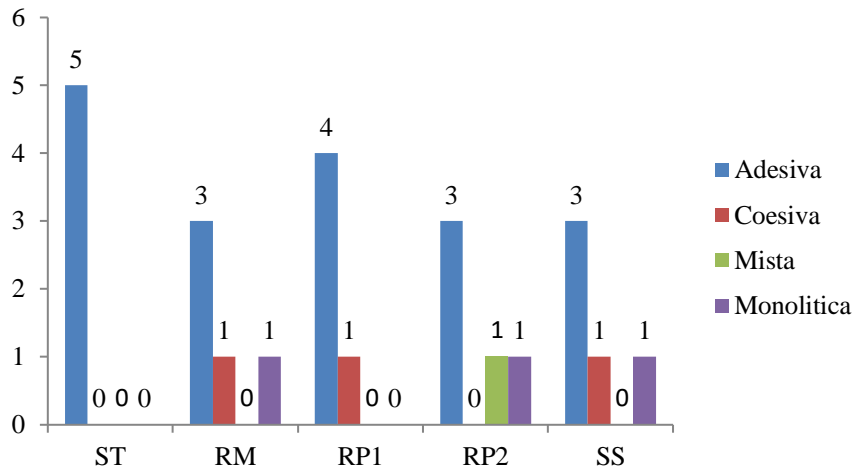


Figura 81- Modos de rotura verificados para cada tratamento em estudo

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões

A resistência de ligação da interface betão-betão é um assunto pertinente que tem já vindo a ser estudado ao longo das últimas décadas. Esta é determinada pela combinação de quatro mecanismos de transferência de esforços destacando-se o "efeito de ferrolho", ou seja, a presença de armadura que atravessa a interface, como o maior contributo no que à transferência de esforços diz respeito, quando comparado aos restantes mecanismos: adesão, coesão e atrito.

O comportamento das interfaces betão-betão é condicionado por alguns parâmetros que influenciam significativamente a resistência ao corte da interface betão-betão, particularmente uma boa preparação da superfície do substrato revela ser uma forte condicionante neste aspecto. Vários parâmetros acabam, no entanto, por não ser considerados em algumas expressões de dimensionamento, as quais têm vindo a sofrer progressos, o que conseqüentemente altera os regulamentos e modelos de previsão da mesma.

Considera-se, que o ensaio adoptado "bi-surface shear test" revela ser adequado para o estudo pretendido pois submete os provetes a forças de corte equivalentes quer no betão do substrato, quer na interface. No entanto os resultados encontrados com o estudo experimental não podem afirmar-se conclusivos pois não foi formado um padrão suficientemente coerente para cada um dos métodos utilizados, verificando-se divergência de resultados em amostras do mesmo grupo experimental.

Contudo, observou-se com clareza que os resultados referentes à superfície lisa - sem tratamento (ST), demonstram os valores de força de rotura mais baixos, como seria expectável. Esta superfície, não tratada, é a mais uniforme de todas as que foram estudadas, correspondendo à que tem o menor coeficiente de variação, pelo que revela uma boa uniformidade de resultados.

Comparando os retardadores de presa comerciais utilizados (RP1 e RP2), para obtenção de rugosidade nas interfaces, pode-se observar que o RP1 aparenta ser menos eficiente no que respeita à transferência de esforços, obtendo-se com este tratamento, essencialmente, roturas pela interface associadas a forças de rotura consideravelmente

inferiores, enquanto que, com o RP2 se obtiveram modos de rotura, também, pelo betão do substrato que corresponderam a forças de rotura superiores, observando-se, assim, que previsivelmente um dos retardadores de presa comercial utilizados, o denominado RP2, revelou ser o tratamento de superfície em estudo mais eficaz na resistência ao corte.

Realça-se que as superfícies tratadas com retardadores comerciais, sendo estes produtos estudados e desenvolvidos em laboratório, devem conduzir a baixa variabilidade de resultados por forma a conferir confiança nos mesmos. Deste modo, os valores obtidos experimentalmente no ensaio descrito neste trabalho, nomeadamente os valores de rotura do RP1, notavelmente inferiores aos do RP2, poderão ser consequência de um eventual problema ou lapso na sua aplicação durante o programa laboratorial.

Verificou-se, ainda, uma proximidade de resultados entre os provetes cuja interface foi raspada manualmente e os provetes tratados com o retardador de presa obtido através da solução de sacarose. Ambos revelaram modos de rotura semelhantes, bem como os valores das forças de rotura respectivos. Ainda que ligeiramente superiores aos das restantes superfícies tratadas, destaca-se, igualmente, a semelhança dos coeficientes de variação destes dois grupos - RM e SS.

Relativamente às superfícies tratadas com a SS, conclui-se que o valor médio da força de rotura é um valor intermédio entre as duas opções comerciais. O seu coeficiente de variação é sensivelmente superior ao dos RP1 e RP2, contudo, trata-se de uma solução praticamente gratuita e aparentemente eficaz, se controlada, demonstrando potencial utilidade a um baixo custo.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Os estudos relativos a esta área devem ser aprofundados nas variadas partes que o tema engloba para uma melhor compreensão dos mecanismos inerentes e para que os conhecimentos desenvolvidos possam ser aplicados na prática, resultando numa construção associada a uma melhoria contínua.

Perante os resultados pouco conclusivos que se observaram através da campanha experimental efectuada, fica uma “porta aberta” para novas investigações no âmbito da avaliação da resistência ao corte de interfaces betão-betão tratadas com retardadores de

presa, naturais ou não. Poderão futuramente ser envolvidos outros retardadores de presa nos estudos, bem como, ser testados diferentes ensaios com diferentes direcções de betonagem.

Tendo em conta o resultado obtido para o valor de rotura da superfície tratada com RP1, que, como verificado, é consideravelmente inferior ao valor de rotura da superfície tratada com RP2, deixa-se a sugestão de elaborar novos ensaios com estes produtos num desenvolvimento futuro por forma a avaliar a efectiva adequabilidade de cada um.

Dada a utilização do um retardador de presa obtido através de solução de sacarose, acresce a necessidade de perceber se o mesmo trará efeitos secundários a médio/longo prazo, pelo que se sugere, também, o estudo do seu efeito como um trabalho futuro.

Sugerem-se, igualmente, pesquisas que podem ser relevantes para o avanço do conhecimento nesta matéria como a realização de estudos que integrem métodos de atribuição de rugosidade semelhantes aos do presente trabalho e a introdução de outros que testados com diferentes ensaios, possam conceber dados para comparações e análise de possíveis coincidências de resultados.

Poderá, ainda, ser feita uma verificação da influência dos métodos de atribuição de rugosidade com retardadores de presa em interfaces cujas camadas de betão apresentem maiores e menores diferenças de idades com finalidade de relacionar rigidez e retracção diferenciais nestes casos.

Referências

- [1] Cunha, A., *Manual de Controlo de Qualidade de Construções Pré-fabricadas*, in *Mestrado, Departamento de Engenharia Civil*. 2011, I.S.T.: Lisboa.
- [2] Machado, R., et al., *Estruturas Prefabricadas de Edifícios*, in *Apresentação DECivil, GESTEC, IST, POSI*. p. 1-116.
- [3] FIB, *Structural Connections for Precast Concrete Buildings*, in *Guide to practice, Bulletin 43*, CEB, Editor. 2008.
- [4] Júlio, E., Branco F., Silva, V., *Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing*. 2003 Prog. Struct. Engng Mater.
- [5] Borges, A., *Análise do Comportamento de Juntas de Betonagem*, in *Mestrado, Departamento de Engenharia Civil*. 2008, IST.
- [6] Wicke, M., *Connections for Concrete Overlays*, in *Fastening Technology Manual*. Hilti: Austria.
- [7] Elliott, K., *Precast Concrete Structures*. 2002, Butterworth Heinemann, Great Britain.
- [8] Zilch, K., Reinecke, R., *Capacity of shear joints between high-strength precast elements and normal-strength cast-in-place decks*. 25-27 September 2000, FIB International Symposium on High Performance Concrete: Orlando, USA.
- [9] Bissonnette, B., Vaysburd, A., Fay, K., *Best Practices for Preparing Concrete Surfaces Prior to Repairs and Overlays*. 2012: Colorado.
- [10] Casal, B., *Ligações Entre Betões de Idades Diferente Aplicações Diversas*, in *Mestrado, Departamento de Engenharia Civil*. 2011, IST: Lisboa.
- [11] FIB, *Model Code 2010*, in *Final draft*, CEB, Editor. March 2012.
- [12] Santos, P., *Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers*, PhD Departamento de Engenharia Civil. 2009, FCTUC.
- [13] Wallenfelsz, J., *HORIZONTAL SHEAR TRANSFER FOR FULL-DEPTH PRECAST CONCRETE BRIDGE DECK PANELS*, MSc, Department of Civil and Environmental Engineering. 2006, Virginia Polytechnic Institute.
- [14] Birkeland, P., Birkeland, H., *Connections in Precast Concrete Construction*. 1966, ACI Journal. p. 345-368.
- [15] Walraven, J., Reinhardt H., *Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading*. 1981.
- [16] Santos, P., Júlio, E., *A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces*. 2012, Construction and Building Materials. p. 912-923.
- [17] Telford, T., *Repair and strengthening of concrete structures*, in *Guide to good practice*. 1991, Fédération Internationale de la Précontrainte: London.
- [18] Santos, D., *Ligações Coladas Betão-Betão com Resina de Epoxi*, MSc, Departamento de Engenharia Civil. 2012, Instituto Politécnico de Leiria
- [19] *EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Projeto de Estruturas de Betão*, in *Parte 1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*.
- [20] FIB, *Model Code 2010*, in *First complete draft*, CEB, Editor. March 2010.

- [21] Santos, P., Júlio, E., *Development of a laser roughness analyser to predict in situ the bond strength of concrete-to-concrete interfaces*. 2008 Magazine of Concrete Research. p. 329-337.
- [22] Santos, P., Júlio, E., *Factors Affecting Bond between New and Old Concrete*. 2011, ACI Materials Journal. p. 449-456.
- [23] Helene, P., *Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto*. 1992, Pini Editora: São Paulo - Brasil.
- [24] Abalaka, A., *Effects of Sugar on Physical Properties of Ordinary Portland Cement Paste and Concrete*. 2011: Federal University of Technology Nigeria. p. 225-228.
- [25] Susilorini, R., et al., *The Early Age Performance of Concrete with Natural Retarder*. 2009: Jakarta. p. 219-226.
- [26] Bruere, G.M., *Set-Retarding Effects of Sugars in Portland Cement Pastes*. Out. 1966. p. 502-503.
- [27] Yamamoto, Y., *Retarders for Concrete and Their Effects on Setting Time and Shrinkage*. 1972, JHRP: Purdue University and Indiana State Highway Commission
- [28] Govindasamy, J., *The Effect of Over Dosage of Concrete Retarder Daratard 40 in Concrete*, in *Civil - Structure*. 2005, Universiti Teknologi Malaysia.
- [29] Khan, B., Baradan, B., *The Effect of Sugar on Setting-Time of Various Types of Cements*. 2002, SCIENCE VISION: Faculty of Civil Engineering, Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey. p. 71-78.
- [30] Júlio, E., *Reforço de Elementos Estruturais em Betão com uma Nova Camada de Betão*. 2009, 1º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes: Lisboa.
- [31] Júlio, E., *Estruturas Prefabricadas – Ligações entre betões de diferentes idades*. 2011/2012, IST: Lisboa. p. 1-74.
- [32] CAE, *Guidelines for the use of structural precast concrete in buildings*, in *Centre for Advanced Engineering*. 1991, New Zeland Concrete Society: New Zeland National Society for Earthquake Engineering.
- [33] Birkeland, P., Birkeland, H., *Connection in Precast Concrete Construction*. ACI Journal. p. 345-368.
- [34] Hollaway, L.C. and M.B. Leeming, *Strengthening of reinforced concrete structures*. 2000, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
- [35] Anderson, A.R., *Composite designs in precast and cast-in-place concrete*. September 1960, Progressive Architecture. p. pp. 172-179.
- [36] Mattock, A.H., Hawkins, N.M., *Shear transfer in reinforced concrete – recent research*. March-April 1972, Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Journal. p. 55-75.
- [37] Santos, P., Júlio, E., *A state-of-the-art review on shear-friction*. 2012, ELSEVIER. p. 435-448.
- [38] Loov, R.E., *Design of precast connections, Paper presented at a seminar organized by Compa International Pte*. September 1978: Singapore. p. 8.
- [39] Randl, N., *Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness*. 1997, Universidade de Innsbruck. p. 379.

- [40] ACI318-14, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*, A.C. Institute, Editor. 2014, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI 48331.
- [41] Bakhsh, K., *Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs*, MSc, *Infrastructure Engineering*. 2010, Royal Institute of Technology (KTH): Stockholm.
- [42] Silfwerbrand, J., *Shear bond strength in repaired concrete structures*. 2003, *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*. p. 419-424.
- [43] Momayez, A., et al., *Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials*. 2005, Elsevier: *Cement and Concrete Research*. p. 748-757.
- [44] NP-1379 *Inertes Para Argamassas e Betões*, in *Análise Granulométrica*. 1976.
- [45] EN 12390-6 *Ensaio do betão endurecido*, in *Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes*. 2003.
- [46] EN 12390-3 *Ensaio de betão endurecido*, in *Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*. 2003.

Anexos

Anexo A: Ficha técnica - Master Finish SRT 488, BASF

Anexo B: Ficha técnica - Rugasol[®] 2 Líquido, SIKA