

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e deve-se à combinação de ideias e influências enriquecedoras que se foram juntando ao longo de todo o percurso académico e que para isso contribuíram um vasto leque de pessoas a quem desde já expresso o meu muito obrigado, em particular:

Aos meus pais, irmã e namorada pelo incansável apoio, carinho, dedicação e compreensão do longo de todo este percurso, por sempre terem acreditado em mim e nas minhas capacidades.

Agradeço ao Professor Eduardo Pereira por me ter orientado e possuir um papel importante no desenvolvimento da minha formação académica, pela disponibilidade, positivismo e apoio.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em particular o Sr. Matos e Marco, ao Engenheiro João Almeida pelo apoio, ensinamentos e contribuição prestada ao longo do desenvolvimento do trabalho experimental.

Por último, agradeço a todos os meus amigos que ao longo desta caminhada me acompanharam, pelo seu companheirismo, força e apoio em todos os momentos, em especial ao José Silva, Nuno Carvalho, Ricardo Machado e Tiago Sousa.

Resumo

As estruturas de alvenaria são a solução construtiva mais antiga e ainda hoje representam um importante sistema construtivo no parque habitacional português. Estas, devido à sua idade e falta de manutenção carecem de intervenções estruturais. A fim de melhorar o comportamento das alvenarias, em especial os problemas associados às cargas laterais, podem ser aplicadas diversas técnicas. Para este fim, na presente pesquisa vai ter-se como base o sistema ARMO, constituído por ARMO-crete.

O presente trabalho de investigação tem como principal foco proporcionar um método que permita caracterizar a interface entre dois materiais distintos, neste caso entre o ARMO-crete e um dos tipos de alvenaria mais usuais em Portugal, o granito.

De forma a caracterizar esta interface, começou-se por realizar uma análise ao material de reforço. Para tal realizaram-se diversos ensaios de flexão, compressão e resistência à tracção, para assim se conhecerem melhor as propriedades mecânicas dos materiais a estudar.

O núcleo desta dissertação é composto essencialmente por uma caracterização experimental da interface entre os objectos e ainda por uma análise da rugosidade do material de alvenaria usado. Para tal realizaram-se ensaios experimentais de corte para três diferentes tipos de granito, obtendo-se o critério de rotura para estados de tensão no plano. No que diz respeito à análise da rugosidade foram realizados dois tipos de ensaio diferentes com vista a uma comparação entre eles. Deste modo, realizou-se ensaios recorrendo a um sensor laser e ainda recorrendo a fotografia digital. Por último pretendeu-se efectuar um estudo da influência da rugosidade sobre a interface entre materiais de substrato e de reforço, por intermédio dos resultados obtidos nos ensaios de corte.

Palavras-chave: Alvenaria; Interface; Ensaio de corte; Fotografia digital; Rugosidade;

Abstract

The masonry structures are the oldest constructive solution and even today represents an important building system on Portuguese habitational park. This, because of their age and lack of maintenance require structural interventions. In order to improve the performance of the masonry, in particular the problems associated with the lateral loads, different techniques may be applied. For this purpose, in this study will be taken based on the ARMO system made by ARMO-crete.

This research work is mainly focused on providing a method that allows to characterize the interface between two different materials, in this case, between the ARMO-crete and one of the most common types pf masonry in Portugal, granite.

In order to characterize this interface, it was first performed an analysis of the reinforcing material. For this, there have been made many trials of flexion, compression and tensile strength, thereby to better understand the mechanical properties of the material to study.

The heart of this dissertation is composed mostly by an experimental characterization of the interface between the objects and also by an analysis of the roughness of masonry material used. Therefor shear experimental trials were carried out for three different types of granite, obtaining the rupture criterion for tension states on the plan. About the analysis of two different types of roughness, experiments were carried out with the aim of comparing them. Thereby, assays were carried out using a laser sensor and also using digital photography. Finally, it was intend to conduct a study of the influence of roughness on the interface between the substrate and reinforcement materials through the test results obtained on the cutting trials.

Keywords: Masonry, Shear testes, Digital Photography, Roughness

Lista de abreviaturas e simbologia

A – área;

A_{eff} – área efectiva;

c – coesão;

E – energia dissipada durante processo de propagação da fenda;

F_u – força máxima atingida durante o ensaio pull-off;

LVDT – transformador de diferencial linear variável;

R_a – rugosidade média;

R_f – resistência à flexão;

R_p – máximo valor dos picos;

R_q – desvio quadrático médio;

R_t – altura máxima do perfil;

R_v – máximo valor dos vales;

σ – tensão normal;

τ_p – tensão tangencial de pico;

τ_r – tensão tangencial residual;

φ – ângulo de atrito;

χ – resistência à tracção;

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Lista de abreviaturas e simbologia	ix
Índice de figuras	xv
Índice de tabelas	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Visão geral sobre a construção em Alvenaria	5
2.1 Alvenaria em Portugal	5
2.2 Comportamento das alvenarias quando sujeitas a ações sísmicas	8
2.3 Reforço das paredes de alvenaria.....	10
2.3.1 Injecções	12
2.3.2 Substituição do material degradado.....	13
2.3.3 Pregagens.....	13
2.3.4 Refechamento de juntas	14
2.3.5 Reforço com alvenaria armada	15
2.3.6 Reboco armado	16
2.3.7 Encamisamento.....	17
2.3.8 Reforço com materiais compósitos de matriz polimérica (FRP).....	18
2.3.9 Reforço com materiais de matriz cimentícia (FRCM)	20
2.4 Análise do comportamento estrutural e modelação numérica de alvenaria.....	22
2.5 Rotura de materiais frágeis	22
2.5.1 Rankine.....	24
2.5.2 Tresca.....	25
2.5.3 Von Mises.....	25
2.5.4 Mohr	25
2.5.5 Mohr Coulomb	26
2.5.6 Drucker-Prager	27
3 Propriedades mecânicas do ARMO-crete	29

3.1	Descrição geral do material	29
3.2	Ensaio de flexão	30
3.3	Ensaio de compressão	33
3.4	Ensaio de arrancamento por tracção (pull-off)	35
3.5	Discussão de resultados	39
4	Comportamento mecânico da interface entre argamassa de ARMO-crete e granito	41
4.1	Ensaio para caracterização experimental do comportamento ao corte da interface	41
4.2	Programa experimental: preparação de provetes	43
4.3	Procedimento experimental adotado na realização dos ensaios de corte.....	48
4.4	Resultados.....	51
4.5	Discussão de resultados	58
5	Análise da rugosidade da superfície de granito.....	67
5.1	Metodologias existentes para a caracterização da rugosidade.....	67
5.1.1	Inspeção Visual	68
5.1.2	“Sand patch test”	69
5.1.3	“Outflow meter”	70
5.1.4	“Circular texture meter”	71
5.1.5	“Digital surface roughness meter”	71
5.1.6	“Slit-Island method”	72
5.1.7	“Mechanical Stylus”	73
5.1.8	“3D laser scanning”	73
5.2	Parâmetros caracterizadores da topografia das superfícies.....	74
5.3	Caracterização da superfície com recurso ao laser SICK	76
5.3.1	Resultados.....	78
5.4	Caracterização da superfície com recurso à fotografia digital.....	85
5.4.1	Resultados.....	86
5.5	Discussão de resultados	95
6	Influência da rugosidade no comportamento mecânico da interface	103
6.1	Ensaio laser Sick vs ensaio de corte	104
6.2	Ensaio fotografia digital vs ensaio de corte	111
6.3	Ensaio laser vs ensaio fotografia digital	118
7	Conclusões e trabalhos futuros.....	121

7.1	Conclusões	121
7.2	Trabalhos futuros	125
	Bibliografia.....	127
	Anexos.....	131
	Anexo I – Caracterização dos provetes de ARMO-crete.....	132
	Anexo II – Algoritmo “trust-region”, “curve fitting” Matlab	133

Índice de figuras

Figura 1 - Exemplos de construções em alvenaria de pedra (a) Ponte da Lagoncinha (b) Castelo de Guimarães.....	5
Figura 2 - Edifícios em Portugal, segundo época de construção e principais materiais...	6
Figura 3 - Evolução das paredes de alvenaria	7
Figura 4 – Edifícios em Portugal, segundo tipo de construção e estado de conservação.	7
Figura 5 - Esquemas de rotura sísmica (a) rotura fora do plano da parede (b) rotura no plano da parede.....	9
Figura 6 - Mecanismos de rotura de painéis de alvenaria (a) Rotura ao longo das juntas (b) Fissuração diagonal (c) Rotura por esmagamento dos cantos	9
Figura 7 - Mecanismo de rotura no plano da parede	10
Figura 8 - Mecanismo de rotura para fora do plano da parede.....	10
Figura 9 - Técnicas de consolidação por injeção.....	13
Figura 10 - Técnica de consolidação por reposição do material	13
Figura 11 - Técnica de consolidação através de pregagens.....	14
Figura 12 - Fases do refechamento de juntas em ambas as faces.....	15
Figura 13 - Alvenaria armada (a) dois tipos de armadura de junta (b) aplicação da armadura em paredes simples e duplas.....	16
Figura 14 - Reparação de fenda e parede com técnica de reboco armado.....	17
Figura 15 - Aplicação da técnica de encamisamento em ambos os lados da parede (8)	18
Figura 16 - Diferentes disposições de FRP (a) grelha ortogonal (b) Diagonal (8).....	19
Figura 17 - Argamassa com reforço FRCM	21
Figura 18 - Instalação do sistema de reforço FRCM.....	21
Figura 19 - Diferentes modos de rotura obtidos através da mecânica da fractura.....	24
Figura 20 - Critério de cedência de Rankine	24
Figura 21 - Representação gráfica do critério de cedência de Mohr	27
Figura 22 - Superfícies de rotura de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager (8).....	28
Figura 23 – Esquema do ensaio de flexão (dimensões em mm)	30
Figura 24 - Ensaio de flexão - Força vs Flecha	31
Figura 25 - Máquina de ensaio; Abertura de fenda no provete	32
Figura 26 - Esquema do ensaio de compressão	34
Figura 27 - Ensaio de compressão	34
Figura 28 - Abertura de ranhura e colagem de pastilha.....	36
Figura 29 - Equipamento utilizado no ensaio pull-off.....	36
Figura 30 - Rotura por adesão e coesão.....	37
Figura 31 - Rotura obtida na superfície serrada, jato de areia e bujardada	39
Figura 32 - " <i>Couplet test</i> " (19)	42
Figura 33 - " <i>Van der Pluijm test</i> " (19)	42
Figura 34 - " <i>Triplet test</i> " (19).....	43
Figura 35 - Setup proposto por Graça Vasconcelos (18).....	43
Figura 36 - Molde de polistereno extrudido	47
Figura 37 - Pedra de granito	47
Figura 38 - Abertura de juntas na pedra de granito para melhor aderência.....	47

Figura 39 - Preparação do ARMO-crete	47
Figura 40 - Blocos finalizados.....	47
Figura 41 - Proвете finalizado.	47
Figura 42 - Esquema de ensaio de corte	48
Figura 43 - Avaliação da rigidez do sistema de aplicação de carga e reacção	49
Figura 44 - Pormenor do esquema de ensaio.....	50
Figura 45 - Posições dos LVDT's.....	50
Figura 46 - Detalhe do provete em posição de ensaio.....	51
Figura 47 - Perspetiva geral do esquema de ensaio, incluindo o sistema de reacção, atuador e sistema de desmultiplicação do deslocamento.....	51
Figura 48 - Força [kN] vs tempo [s].....	52
Figura 49 - Força [kN] vs deslocamento [mm]	52
Figura 50 - Comportamento obtido no ensaio de corte	54
Figura 51 - Respostas obtidas nos ensaios dos provetes com superfície serrada.	55
Figura 52 - Respostas obtidas no ensaio de superfície jato de areia.....	56
Figura 53 - Respostas obtidas no ensaio de superfície bujardada	57
Figura 54 - Representação gráfica do critério de cedência de Mohr no plano.	59
Figura 55 - Critério de rotura superfície serrada para tensões de pico (x- tensões normais; y- tensão tangencial de pico [MPa])......	60
Figura 56 - Critério de rotura superfície jato de areia para tensões de pico (x- tensões normais; y- tensão tangencial de pico [MPa])......	60
Figura 57 - Critério de rotura superfície bujardada para tensões de pico (x- tensões normais; y- tensão tangencial de pico [MPa])......	61
Figura 58 - Comparação entre as três superfícies estudadas	62
Figura 59 - Critério de rotura na superfície serrada para tensões residuais (x- tensões normais; y- tensão tangencial residual [MPa])......	64
Figura 60 - Critério de rotura da superfície jato de areia para tensões residuais (x- tensões normais; y- tensão tangencial residual [MPa]).	64
Figura 61 - Critério de rotura da superfície bujardada para tensões residuais (x- tensões normais; y- tensão tangencial residual [MPa])......	64
Figura 62 - Esquema de sistemas de medição da rugosidade (Adaptado de Grasselli, 2001).....	68
Figura 63 - Sand patch test (a) antes do espalhamento da areia (b) depois do espalhamento da areia.....	70
Figura 64 - Método Outflow Meter	71
Figura 65 - Digital surface roughness meter	72
Figura 66 – “Silt-Island method” (a) preparação provete (b) vista do topo das ilhas	72
Figura 67 – Técnica “Mechanical stylus”.....	73
Figura 68 – Aparelho de “3D laser scanning”.....	74
Figura 69 - Laser SICK	77
Figura 70 - Ensaio com laser SICK.....	78
Figura 71 - Perfis verticais obtidos na superfície serrada.....	79
Figura 72 - Perfis horizontais obtidos na superfície serrada	80
Figura 73 - Perfis verticais obtidos na superfície jato de areia.....	81

Figura 74 - Perfis horizontais obtidos na superfície jato de areia	82
Figura 75 - Perfis verticais obtidos na superfície bujardada	83
Figura 76 - Perfis horizontais obtidos na superfície bujardada	84
Figura 77 - Esquema de ensaio para levantamento fotográfico da superfície a analisar.	85
Figura 78 - Programa usado para obtenção dos perfis	86
Figura 79 - Modelo tridimensional da superfície serrada.....	87
Figura 80 - Perfis verticais obtidos na superfície serrada.....	87
Figura 81 - Perfis horizontais obtidos na superfície serrada	88
Figura 82 – Modelo tridimensional da superfície jato de areia	89
Figura 83 - Perfis verticais obtidos na superfície jato de areia.....	90
Figura 84 - Perfis horizontais obtidos na superfície jato de areia	91
Figura 85 – Modelo tridimensional da superfície bujardada.....	92
Figura 86 - Perfis verticais obtidos na superfície bujardada	93
Figura 87 - Perfis horizontais obtidos na superfície bujardada	94
Figura 88 - Comparação dos perfis V7 na superfície serrada.....	97
Figura 89 - Comparação dos perfis V5 na superfície jato de areia.....	97
Figura 90 - Comparação dos perfis V2 na superfície bujardada	98
Figura 91 - Comparação dos perfis V6 ao longo de uma largura de 1 mm na superfície serrada.....	99
Figura 92 - Comparação dos perfis V5 ao longo de uma largura de 1mm na superfície jato de areia.....	99
Figura 93 - Comparação dos perfis V5 ao longo de um milímetro de largura na superfície bujardada.....	100
Figura 94 - Tensão de pico e residual vs rugosidade média, R_a	105
Figura 95 - Tensão de pico e residual vs altura máxima do perfil, R_t	105
Figura 96 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) (E) vs rugosidade média R_a	106
Figura 97 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) vs altura máxima do perfil R_t	107
Figura 98 - Ângulo de atrito, ϕ vs rugosidade média, R_a	108
Figura 99 - Ângulo de atrito, ϕ vs altura máxima do perfil, R_t	108
Figura 100 - Resistência à tracção, χ vs rugosidade média, R_a	109
Figura 101 - Resistência à tracção, χ vs altura máxima do perfil, R_t	109
Figura 102 - Coesão, c, vs rugosidade média, R_a	110
Figura 103 - coesão, c vs altura máxima do perfil, R_t	110
Figura 104 - Tensão de pico e residual vs rugosidade média, R_a	112
Figura 105 - Tensão de pico e residual vs altura máxima do perfil, R_t	112
Figura 106 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) (E) vs rugosidade média, R_a	113
Figura 107 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) (E) vs altura máxima do perfil, R_t	114
Figura 108 - Ângulo de atrito, ϕ vs rugosidade média, R_a	115
Figura 109 - Ângulo de atrito, ϕ vs altura máxima do perfil, R_t	115
Figura 110 - Resistência à tracção, χ vs rugosidade média, R_a	116

Figura 111 - Resistência à tracção, χ vs altura máxima do perfil, R_t	116
Figura 112 - Coesão, c , vs rugosidade média, R_a	117
Figura 113 - Coesão, c vs altura máxima do perfil, R_t	118

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades do ARMO-crete	30
Tabela 2 - Resultados obtidos através dos ensaios de flexão	32
Tabela 3 - Resultados obtidos nos ensaios de compressão.....	35
Tabela 4 - Resultado obtido no ensaio de pull-off superfície serrada	38
Tabela 5 - Resultado obtido no ensaio de pull-off superfície jato de areia	38
Tabela 6 - Resultado obtido no ensaio de pull-off superfície bujardada.....	38
Tabela 7 - Resultados obtidos nos ensaios de flexão e compressão	39
Tabela 8 - Valores obtidos nos ensaios de pull-off	40
Tabela 9 – Procedimentos da preparação dos provetes	44
Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios dos provetes com superfície serrada.....	56
Tabela 11 - Resultados obtidos nos ensaios de superfície jato de areia	57
Tabela 12 - Resultados obtidos nos ensaios de superfície bujardada	58
Tabela 13 - Parâmetros do critério de Mohr estimados através do algoritmo "Trust-Region".....	61
Tabela 14 - Parâmetros do critério de Mohr estimados pelo algoritmo “Trust-Region” para tensões residuais	65
Tabela 15 - Características técnicas laser SICK.....	76
Tabela 16 - Valores obtidos para perfis verticais na superfície serrada (mm)	79
Tabela 17 - Valores obtidos para perfis horizontais na superfície serrada (mm).....	80
Tabela 18 - Valores obtidos para perfis verticais na superfície jato de areia	81
Tabela 19 - Valores obtidos para perfis horizontais na superfície jato de areia.....	82
Tabela 20 - Valores obtidos para perfis verticais na superfície bujardada.....	83
Tabela 21 - Valores obtidos para perfis horizontais na superfície bujardada.....	84
Tabela 22 - Resultados dos parâmetros de rugosidade obtidos para a superfície serrada (mm.)	88
Tabela 23 - Resultados obtidos nos perfis horizontais nos ensaios de superfície serrada (mm)	88
Tabela 24 - Resultados obtidos nos perfis verticais nos ensaios de superfície de jato de areia (mm).....	90
Tabela 25 - Resultados obtidos nos perfis horizontais nos ensaios de jato de areia (mm)	91
Tabela 26 - Resultados obtidos nos perfis verticais na superfície bujardada (mm)	93
Tabela 27 - Resultados obtidos nos perfis horizontais nos ensaios de superfície bujardada (mm).....	94
Tabela 28 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos com a técnica do laser (mm).....	96
Tabela 29 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos com a técnica de fotografia digital (mm).	96
Tabela 30 - Valores médios dos parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios de corte.	103
Tabela 31 - Valores médios obtidos dos parâmetros que caracterizam a rugosidade. .	104

Tabela 32 - Graus de correlação obtidos entre os parâmetros de rugosidade e as características mecânicas dos ensaios de corte, considerando ambas as técnicas de caracterização da rugosidade.	118
Tabela 33 - Sumário dos resultados da análise da rugosidade	124
Tabela 34 - Características provetes para caracterização do ARMO-crete	132
Tabela 35 - Iterações obtidas para superfície serrada.....	133
Tabela 36 - Iterações obtidas para a superfície jato de areia	133
Tabela 37 - Iterações obtidas para a superfície bujardada.....	134

1 Introdução

1.1 Generalidades

Todas as obras, desde as mais básicas às mais elaboradas, têm por base uma ideia que irá originar um projecto mais ou menos complexo, mais ou menos substancial. Nos variados projectos, podem-se perspectivar vários materiais, diversos níveis de pormenor, o planeamento e rigor das diferentes tarefas. As alvenarias não fogem a esta regra, sendo então importante definir todos os parâmetros que se relacionam com a sua construção.

Frequentemente devido à falta de cuidado na elaboração dos projectos, as paredes de alvenaria têm sido esquecidas, apenas sendo mencionados os materiais a usar, o que leva a que a sua execução não seja realizada com a maior qualidade. Assim, é possível destacar diversas anomalias que vêm de encontro a esta falta de cuidado na projecção e realização das alvenarias, prejudicando assim as características mecânicas, logo o seu desempenho.

A fim de melhorar a concepção e o desempenho dos elementos de alvenaria, existem técnicas de reforço, mais tradicionais ou mais inovadoras que permitem anular ou melhorar significativamente os erros anteriormente cometidos, melhorando assim o comportamento mecânico destas estruturas.

Com a aplicação de camada de reforço na alvenaria, estamos a alterar as suas características, podendo ser o reforço mais ou menos compatível com a alvenaria usada. Assim, pretende-se analisar as características das matrizes cimentícias quando usadas em alvenarias. Neste contexto será importante conhecer as suas principais vantagens e desvantagens, o seu modo de aplicação e ter ainda um bom conhecimento das suas características mecânicas. Outro ponto fundamental será conhecer qual o comportamento do material de reforço quando aplicado sobre uma alvenaria sujeita a esforços de corte.

Por último, para que a análise seja completa e se possa obter uma melhor relação entre a eficiência do reforço e a interface entre os materiais, é importante fazer uma análise da rugosidade da alvenaria, pois a interface entre o material de reforço e a superfície de

alvenaria tendem a ser o elo mais fraco do sistema. Deste modo caracterizar a forma, a variabilidade e profundidade das rugosidades superficiais, certamente serão um ponto importante pois haverá uma grande influência destes no comportamento mecânico da interface.

1.2 Objetivos

A presente dissertação foca a sua importância na influência que a interface entre materiais de alvenaria e reforço possam ter para a sua verdadeira eficiência. Perante estes problemas torna-se fundamental caracterizar o comportamento mecânico da interface entre a alvenaria (granito) e o material de reforço usado no âmbito desta dissertação (ARMO-crete). Ainda, torna-se fundamental dar a conhecer quais os métodos mais importantes para caracterização de rugosidade e os seus parâmetros para um posterior levantamento da rugosidade da superfície de granito. Por último interessa identificar as medidas de melhoramento de compatibilidade entre materiais e qual a relação entre a rugosidade e o comportamento da interface entre materiais.

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho apresenta-se estruturado em seis capítulos que se descrevem sucintamente, excluindo desde logo este capítulo introdutório e as conclusões. A este capítulo introdutório segue-se o capítulo dois que se refere a uma visão geral sobre a construção em alvenaria em Portugal, o seu comportamento face a cargas sísmicas, os métodos de reforço deste tipo de estruturas.

No terceiro capítulo pretende-se dar a conhecer as propriedades mecânicas do ARMO-crete, descrevendo brevemente o material, o seu comportamento à flexão, compressão e ainda a sua resistência à tracção.

Já o quarto capítulo refere-se ao comportamento mecânico da interface entre materiais. O capítulo começa por analisar os tipos de ensaios existentes que permitem fazer esta caracterização, apresentando depois o programa de ensaios realizado e seu procedimento, e por fim todos os seus resultados e conclusões.

No que se refere ao quinto capítulo, aqui pretende-se realizar uma análise da rugosidade do material de alvenaria usado (granito). Primeiramente expôs-se quais os mecanismos

Alvenaria reforçada com compósitos de matriz cimentícia: eficiência do reforço e influência da interface

possíveis para efectuar um levantamento da rugosidade de materiais e ainda quais os principais parâmetros a ser utilizados, expondo-se também as principais vantagens e desvantagens dos variados ensaios. Também neste ponto se mostra os ensaios realizados e seus respectivos resultados e conclusões retiradas com o levantamento feito.

O capítulo seis tem como objectivo analisar qual a influência que a rugosidade dos materiais nos ensaios de caracterização mecânica da interface, isto é relacionar os parâmetros de rugosidade com os parâmetros obtidos nos ensaios de corte.

Finalmente, no capítulo sete sintetizam-se as principais conclusões do trabalho realizado, identificam-se também algumas questões que não foi possível esclarecer, e que deste modo são sugeridas para trabalhos futuros.

2 Visão geral sobre a construção em Alvenaria

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve apresentação da importância da construção em alvenaria em Portugal, em particular como surgiu, quais os problemas mais presentes neste tipo de estruturas, assim como discutir a sua evolução ao longo dos tempos. Posteriormente dá-se a conhecer algumas técnicas de reforço de estruturas de alvenaria mais correntemente usadas. Ainda neste capítulo apresenta-se uma breve análise de alguns dos procedimentos utilizados na modelação numérica deste tipo de estruturas e das funções de cedência mais usadas para caracterizar o comportamento mecânico de alvenarias.

2.1 Alvenaria em Portugal

A alvenaria pertence à categoria das soluções construtivas mais antigas. A história das construções traduz isso mesmo, através de edificações preservadas como templos, fortalezas, castelos, pontes, entre muitas outras obras de arte (1).

Esta técnica de construção surgiu no território português com a civilização Romana, sendo que hoje em dia ainda é possível observar as suas obras de arte no nosso território (ver figura 1).



(a)



(b)

Figura 1 - Exemplos de construções em alvenaria de pedra (a) Ponte da Lagoncinha
(b) Castelo de Guimarães.

Assim, a construção em alvenaria como uma das soluções construtivas mais antigas, desde cedo conciliou funções de envolvente exterior e de compartimentação interior. Ao longo da história também se foram distinguindo três aspetos fundamentais no processo de construção em alvenaria, que consistiam na estética, economia e na engenharia de construção (1).

Considerando os últimos dados estatísticos de Portugal do ano de 2011, deparamo-nos que em Portugal durante várias décadas, a presença de estruturas de alvenaria era maioritária, sendo que por volta do ano de 1970 se procedeu a uma viragem e a uma conseqüente massificação de estruturas de betão. No entanto é importante salientar que cerca de 35% das habitações portuguesas ainda são de alvenaria, representando uma percentagem significativa do património construído, como demonstra a figura 2 (2).

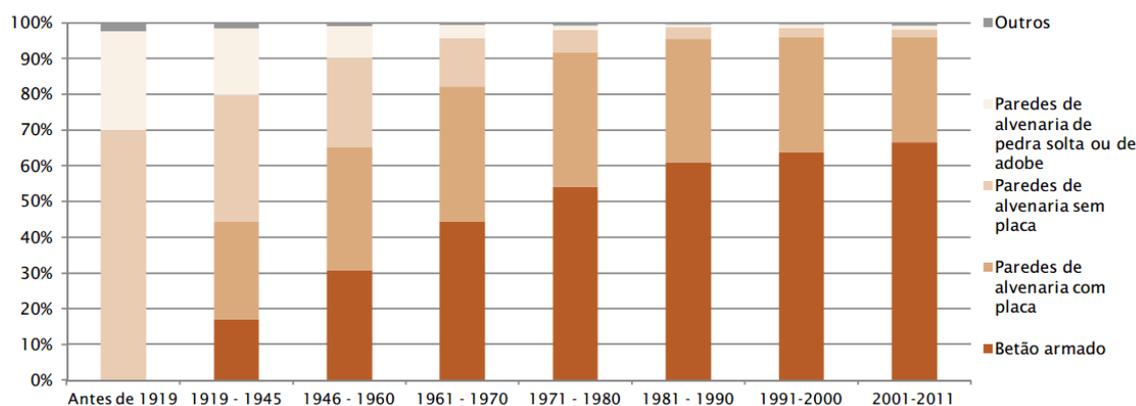


Figura 2 - Edifícios em Portugal, segundo época de construção e principais materiais.

Com as frequentes alterações de técnicas de construção ao longo dos anos, foram surgindo novas e melhoradas formas de aplicação e construção em alvenaria. Assim, ao longo do tempo é possível registar a evolução das paredes de alvenaria em Portugal entre os anos de 1940 até aos dias de hoje, como demonstra a Figura 3. É possível registar que, nos primeiros tempos, a principal função das paredes era sobretudo de aumento da resistência, enquanto que nos dias que correm este tipo de construção tem como principal função o preenchimento das paredes e outras funções como a de conferir eficiência energética aos edifícios, o que resultou no aparecimento das duas camadas de tijolo separadas.

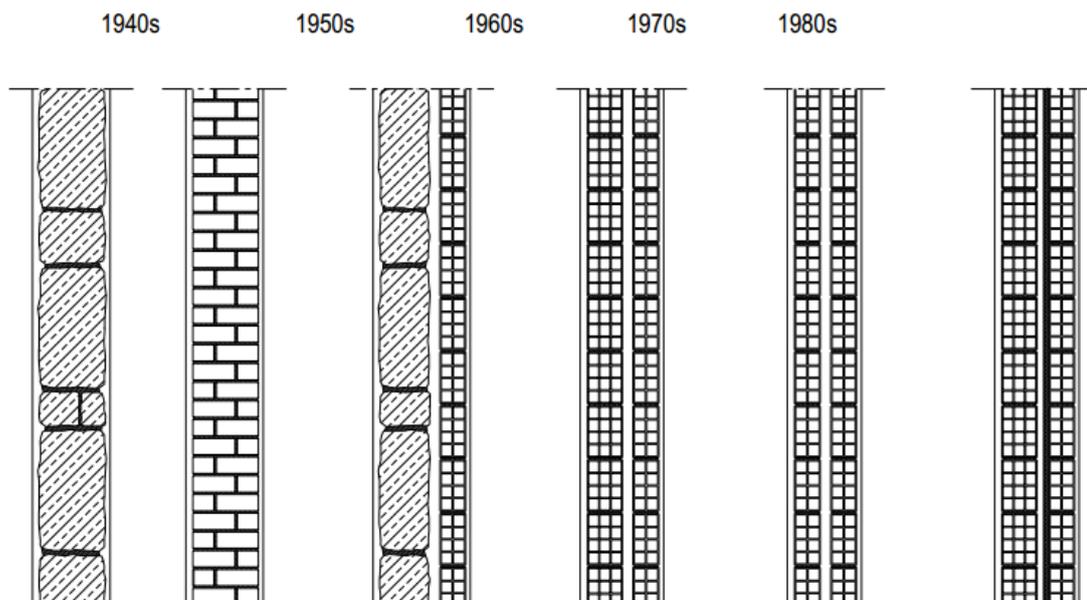


Figura 3 - Evolução das paredes de alvenaria.

Nesta evolução também é possível identificar outras características tais como a maior presença, nos primeiros tempos, de blocos rígidos e pesados de pedra, que ao longo dos tempos foram dando lugar a paredes mais finas e leves de tijolo, preferencialmente cerâmico de origem argilosa (3).

Devido à elevada presença de edifícios de alvenaria antigos em Portugal, a sua necessidade de reparação foi crescendo com o tempo, sendo que em alguns tipos de construção cerca de 60% do património construído pode necessitar de intervenção, como demonstra a figura 4 (2).

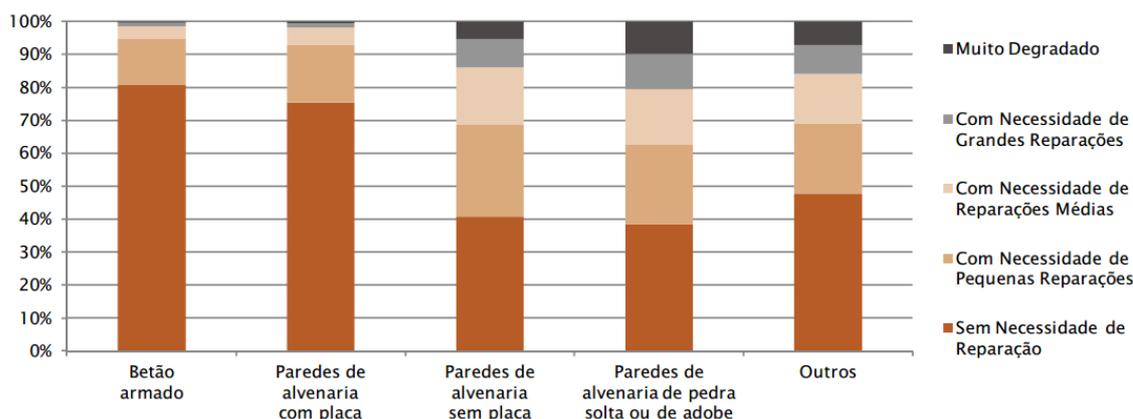


Figura 4 – Edifícios em Portugal, segundo tipo de construção e estado de conservação.

De salientar que, de entre as principais anomalias registadas nos edifícios, se destacam:

- Fissurações;
- Esmagamentos locais;
- Problemas associados à humidade;
- Degradação do desempenho acústico e térmico;
- Deterioração de revestimentos e acabamentos.

Estas anomalias estão associadas a diversas causas como a falta de manutenção, alterações de condições inicialmente previstas, erros de projecto ou execução, assim como devido a acções exteriores como as que resultam da exposição ambiental e as acções humanas (4).

2.2 Comportamento das alvenarias quando sujeitas a acções sísmicas

A maioria das grandes construções em alvenaria localiza-se em zonas históricas nos centros de algumas das cidades mais importantes do mundo. São importantes marcos das diferentes culturas e pontos de elevado interesse para a população mundial, pelo que a preocupação com a sua preservação é elevada. Por esta razão é importante conhecer e melhorar o comportamento destas estruturas, sobretudo face a acções especialmente gravosas, tais como o sismo (3).

O comportamento sísmico das estruturas de alvenaria é difícil de caracterizar devido às diferentes propriedades dinâmicas que estas acções podem apresentar. O comportamento sísmico depende ainda de vários factores como a magnitude do sismo, distancia ao epicentro, tipo de solo, direcção da falha e ainda a frequência da excitação (5).

Apesar das dificuldades de caracterizar as propriedades dinâmicas de acções horizontais como é o caso da acção sísmica, são conhecidos dois modos de rotura das alvenarias na presença deste tipo de cargas. Estes dois modos são a rotura no plano da parede e a rotura para fora do plano da parede. O primeiro mecanismo prende-se com a rotura associada à fendilhação por corte, enquanto que o segundo está relacionado com fenómenos de derrubamento e rotura por flexão, como se pode observar na figura 5.

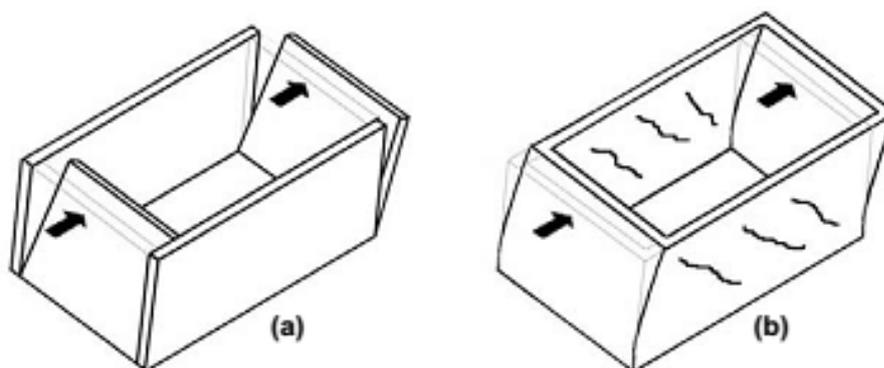


Figura 5 - Esquemas de rotura sísmica (a) rotura fora do plano da parede (b) rotura no plano da parede.

No que se refere ao modo de rotura no plano da parede, habitualmente este ocorre por corte dos panos de alvenaria. Este modo de rotura pode ocorrer como consequência de três factores, como demonstra a figura 6. O primeiro deles tem a ver com a rotura ao longo das juntas através da fendilhação. O segundo modo de rotura tem como principal causa a fendilhação diagonal. O terceiro e último modo resulta do esmagamento dos cantos que estão comprimidos (6).

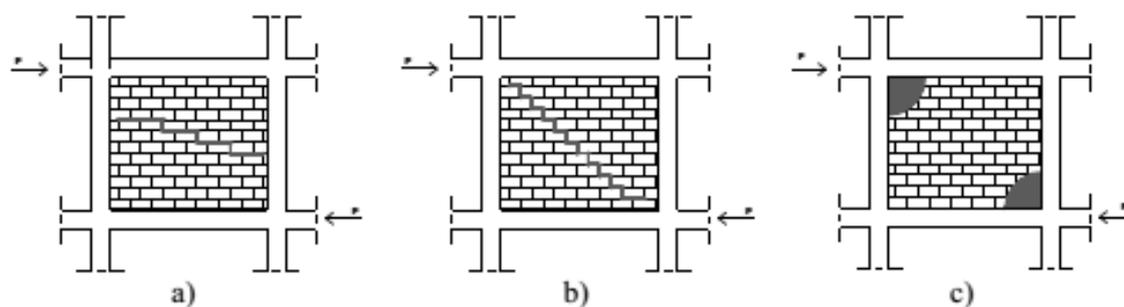


Figura 6 - Mecanismos de rotura de painéis de alvenaria (a) Rotura ao longo das juntas (b) Fissuração diagonal (c) Rotura por esmagamento dos cantos.

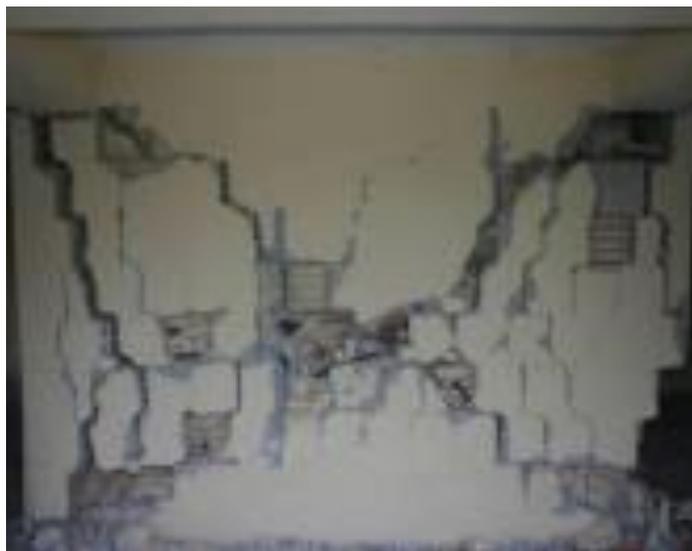


Figura 7 - Mecanismo de rotura no plano da parede

No caso das roturas no para fora do plano da parede esta dá-se por flexão e derrubamento. Neste último caso a acumulação de tensões de compressão na interface entre dois pisos pode levar ao esmagamento, e como consequência a base de apoio do piso superior vai diminuindo, o que leva ao derrubamento da parede como demonstra a figura 8. O derrubamento é um mecanismo de rotura expectável em edifícios antigos.

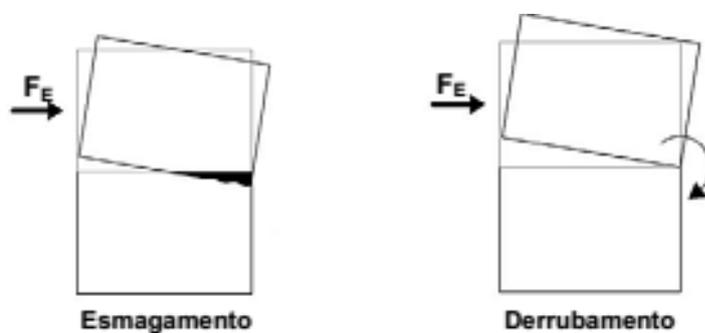


Figura 8 - Mecanismo de rotura para fora do plano da parede.

2.3 Reforço das paredes de alvenaria

Como já foi referido anteriormente, as estruturas em alvenaria configuram uma das soluções construtivas mais antigas, o que desde logo traduz uma forte probabilidade para que algumas destas estruturas apresentem anomalias que necessitam de intervenções mais ou menos urgentes.

Devido ao seu valor cultural, arquitectónico e patrimonial, torna-se imprescindível a conservação e manutenção de estruturas que são maioritariamente construídas utilizando alvenaria, tais como castelos, muralhas e igrejas. Pelo seu interesse, por exemplo, turístico, são importantes mais-valias históricas e económicas. No entanto, nem só os edifícios históricos necessitam de intervenções, também edifícios com idades menos avançadas podem apresentar a mesma necessidade, visto que devido às anomalias descritas anteriormente também estes podem apresentar risco para as populações (7).

As intervenções de reabilitação devem partir de uma cuidadosa e rigorosa avaliação de segurança, no âmbito da identificação do estado de conservação do edifício. Assim, esta avaliação deve centrar-se em quatro pontos fundamentais: primeiro deve ser realizado um estudo do historial do edifício; em segundo lugar deve ser efectuado um diagnóstico que permita detetar possíveis anomalias e o grau de segurança do edifício. Para a realização deste diagnóstico deverá recorrer-se a ensaios para caracterização da estrutura, sendo que estes podem ser realizados em laboratório ou no local de intervenção. O terceiro ponto corresponde à fase de intervenção, na qual é necessário adotar a melhor técnica de forma a resolver os problemas e as deficiências anteriormente diagnosticados. Por último, o quarto ponto prende-se com a necessidade de implementar um plano de manutenção e controlo. Ou seja, é necessário acompanhar a evolução do estado de conservação e resistência da estrutura para que, em primeiro lugar, se possam evitar grandes intervenções futuras e, em segundo lugar, para que quando seja necessário estas ocorram de forma mais simples e eficaz.

Importa ainda salientar que, no caso de estruturas antigas, o nível das intervenções deve ser especialmente cuidado, atendendo a que a sua estabilidade e o seu comportamento estrutural são habitualmente de maior risco quando comparadas com estruturas mais recentes, das quais em geral se possui um conhecimento mais rigoroso.

Cada intervenção para o reforço de alvenaria é única, não havendo, por muito idênticas que sejam, duas intervenções iguais, pois as características arquitectónicas e de construção de cada alvenaria são diferentes e as anomalias presentes em cada uma também serão com certeza diferentes. Tendo em conta este aspecto, torna-se primordial avaliar a vulnerabilidade do edifício e as suas características para aplicar a técnica que melhor se adapta às suas particularidades.

A intervenção a realizar e os sistemas de reforço a utilizar devem possuir três características fundamentais (7):

- Compatibilidade: os materiais e as técnicas usadas devem minimizar qualquer alteração de construção e de funcionamento da estrutura original.
- Durabilidade: os materiais devem ser o mais duráveis possível para assim se garantir um longo período de vida útil.
- Reversibilidade: deve ser assegurada a possibilidade de remover os elementos da intervenção sem provocar danos na construção antiga.

Para reabilitar e reforçar estruturas de alvenaria podem-se usar técnicas tradicionais ou inovadoras, sendo que as primeiras requerem o uso de materiais e processos construtivos idênticos aos usados originalmente, enquanto que no caso das segundas são procuradas soluções mais eficientes. Neste contexto podem-se adotar diferentes estratégias, tais como a modificação do comportamento das estruturas, o aumento de rigidez e/ou resistência de alguns elementos ou a redução ou eliminação de irregularidades (7).

Neste capítulo pretende-se explorar algumas das técnicas correntemente mais utilizadas no reforço das estruturas de alvenaria, tanto técnicas para a consolidação como para o reforço das mesmas.

2.3.1 Injecções

As injecções (figura 9) consistem numa técnica usada essencialmente no reforço de alvenaria de pedra. É uma solução de reforço irreversível, que consiste na injecção de uma calda fluida em furos previamente realizados, alterando-se deste modo as características físicas e mecânicas da alvenaria (5).

Nesta técnica pode-se utilizar diferentes tipos de calda como a cimentícia, hidráulica ou ainda baseadas em resinas orgânicas. A injecção destas caldas deve ser feita por gravidade ou a baixa pressão (0.1 a 0.2 MPa), de modo a evitar efeitos negativos na alvenaria existente (8).

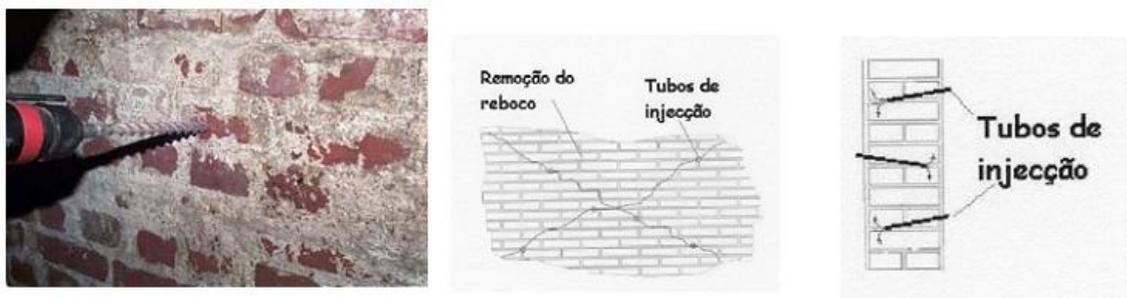


Figura 9 - Técnicas de consolidação por injeção.

2.3.2 Substituição do material degradado

Esta técnica consiste na remoção de elementos na zona degradada e subsequente reconstrução usando materiais como pedras ou tijolos semelhantes à existente. A técnica aqui descrita é normalmente aplicada em pequenas zonas degradadas, como demonstra a figura 10 (8).

Na utilização desta técnica deve-se sempre proceder a um escoramento temporário que suporte a zona envolvente ao elemento a reconstruir, assim como ter em atenção a sequência inicial de colocação das pedras para posteriormente as colocar no mesmo lugar. Por vezes é apenas necessária a colocação de pequenas pedras para o refechamento das juntas.

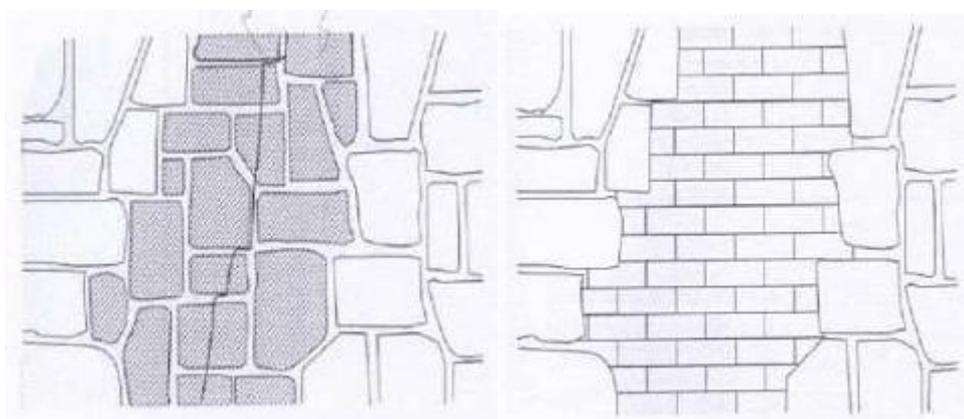


Figura 10 - Técnica de consolidação por reposição do material.

2.3.3 Pregagens

A técnica de pregagens (figura 11) consiste na colocação de barras de aço em furos de pequeno diâmetro, previamente abertos, que atravessam os elementos a reforçar. Após o posicionamento das mesmas barras, os furos são selados com caldas de injeção apropriadas.

Assim, as pregagens podem ser generalizadas, transversais, pregagens-costura e ainda as pregagens longas. As primeiras alteram as propriedades mecânicas da alvenaria tornando-a um material semelhante ao betão armado, aumentando assim a sua resistência à tração, compressão e corte. No que diz respeito às pregagens transversais estas têm como principal função o confinamento transversal das paredes. As pregagens de costura destinam-se a melhorar a ligação entre paredes ortogonais, usando para isso tirantes curtos em aço duro com proteção anti corrosão. Por último, as pregagens longas são usadas principalmente para contrariar a deformabilidade de paredes, podendo ser aplicadas pelo interior ou pelo exterior (9).



Figura 11 - Técnica de consolidação através de pregagens.

2.3.4 Refechamento de juntas

Esta técnica consiste na remoção parcial da camada de argamassa degradada e aplicação de uma nova camada no seu lugar com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade, ver figura 12.

Aquando da execução desta técnica deve proceder-se à remoção parcial da argamassa das juntas (deve ser retirado aproximadamente de 1/3 da espessura total), após esta etapa deve lavar-se as juntas abertas com água a baixa pressão, e posteriormente faz-se um preenchimento das juntas com várias camadas devidamente compactadas com a nova argamassa (5).

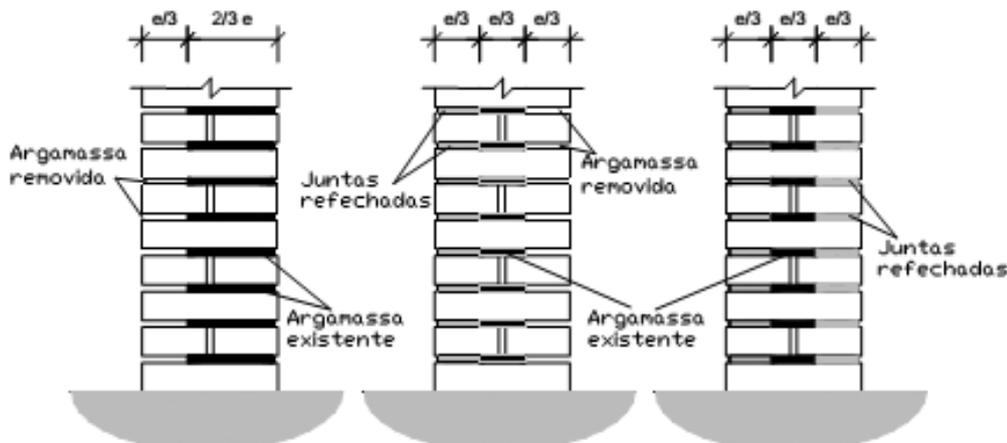


Figura 12 - Fases do refechamento de juntas em ambas as faces.

2.3.5 Reforço com alvenaria armada

A alvenaria armada é uma tecnologia recente. A introdução de armaduras de aço nas juntas horizontais e também em alguns alinhamentos verticais, no caso de presença de tijolos de furação vertical, permite aumentar de forma significativa a resistência mecânica das alvenarias, em particular quando estas estão sujeitas a elevados esforços de corte ou tracção, como se pode ver na figura 13. Assim, esta é uma solução muito apreciada e com grande interesse uma vez que, para além do seu interesse estrutural sob acções horizontais como o vento e o sismo, ou sob cargas concentradas, permite maior liberdade arquitetónica.

Quando utilizada em panos de alvenaria não estrutural, a solução de alvenaria armada permite uma maior capacidade de absorver deformações e solicitações que de outro modo poderiam resultar em níveis de fissuração excessivos. Assim, em certas zonas a colocação de alvenaria armada traduz-se num grande benefício (10).

Para além de um aumento da resistência à fissuração, o sistema de reforço de alvenarias com recurso a armadura tem outras vantagens, como um aumento da qualidade de construção e, a médio e longo prazo, em poupança nos custos de manutenção, uma vez que existe uma redução significativa das patologias associadas à fissuração e conseqüente redução da necessidade de reparação. Importa ainda salientar que a alvenaria armada possui maior ductilidade e maior resistência à tracção nas juntas de argamassa. Trata-se também uma boa solução quando estamos perante grandes panos de alvenaria, como é exemplo o seu emprego na construção de três estádios para o “Euro 2004” (o estádio do Sporting clube de Portugal, o Estádio da Luz e o Estádio Municipal de Braga).

Finalmente, este processo construtivo praticamente não implica alterações no processo de construção de alvenarias tradicional, o que por si só já é uma grande vantagem, uma vez que não implica a reeducação das equipas de construção (9).

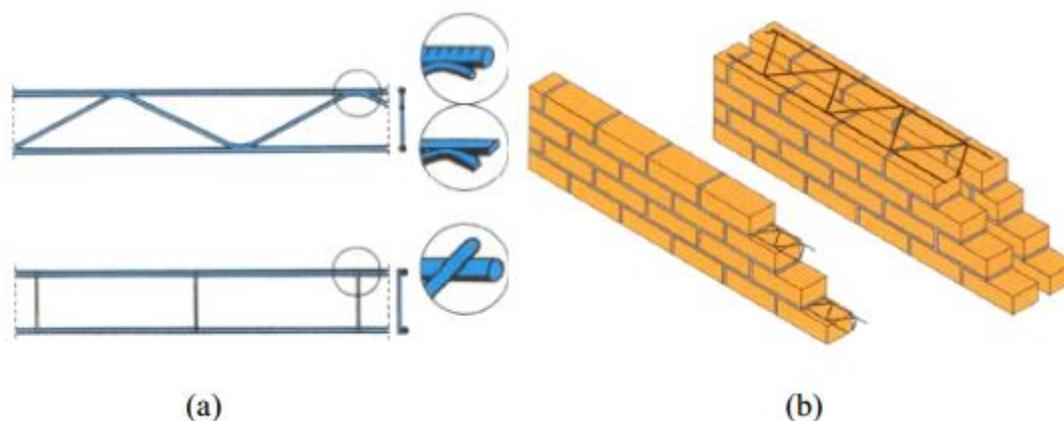


Figura 13 - Alvenaria armada (a) dois tipos de armadura de junta (b) aplicação da armadura em paredes simples e duplas.

2.3.6 Reboco armado

Esta técnica consiste na aplicação de uma armadura de reforço, como por exemplo rede de fibra de vidro, rede electrossoldada, rede de metal, entre outras, fixada à parede através de pregagens, sobre a qual é aplicada uma argamassa de revestimento, manualmente ou projectada, sendo que a camada de argamassa tem espessuras a rondar os 2 e os 3 cm (8) (9).

Esta técnica pode ser realizada em ambos os lados da parede, sendo no entanto mais comum na parte exterior. A aplicação desta técnica dá-se em paredes que apresentam um bom estado geral, no entanto apresentam danos superficiais tais como fissuração excessiva.

O reboco armado tem como principal condicionante a estética. Porém, quando utilizada resulta numa melhoria significativa da ligação entre paredes, do controlo de fendilhação, da ductilidade e da resistência ao corte, como demonstra a figura 14 (9).

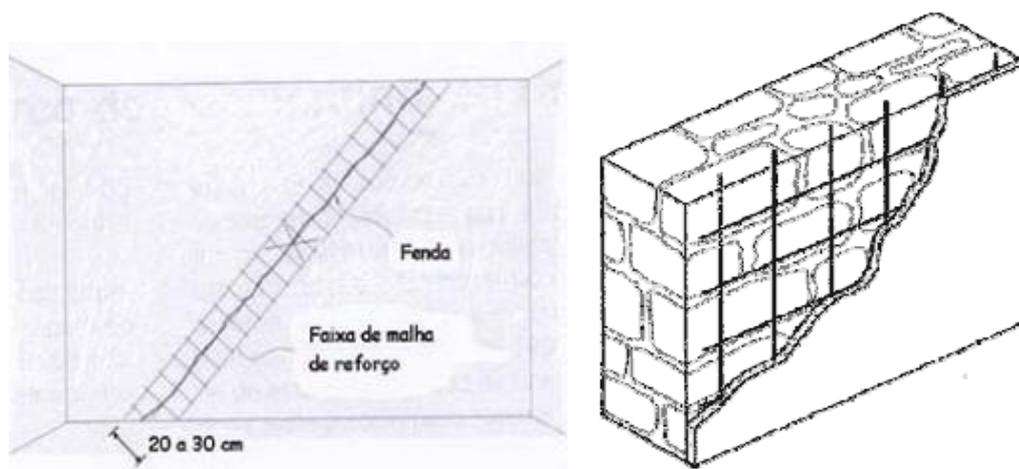


Figura 14 - Reparação de fenda e parede com técnica de reboco armado.

2.3.7 Encamisamento

Esta técnica consiste na aplicação de uma camada de betão reforçado com uma malha de ferro, fixada à parede através de pregagens (figura 15). Pode ser realizada num ou em ambos os lados da parede, tal como o reboco armado, no entanto com espessuras bastantes superiores (cerca de 10 cm) (7).

A prática de encamisamento só deve ser aplicada em último recurso pois é uma técnica bastante invasiva. O encamisamento aplica-se preferencialmente em alvenarias de pedra e tijolo pobres, muito irregulares, com ligações entre materiais fracas ou quando estamos perante argamassas muito deterioradas e ainda misturas de argamassas. Ainda importa referir que esta técnica é de difícil execução, uma vez que diversas vezes se torna complicada a furação das paredes para efectuar as ligações transversais (7) (8).

Aquando da execução desta técnica deve proceder-se á eliminação dos rebocos antigos, libertando todas as peças de argamassa e de pedras soltas que possam impedir uma boa ligação com o novo reboco. Deve ainda ter-se em atenção a necessidade de proceder ao devido tratamento de fissuras e possíveis vazios com caldas de cimento ou resinas. Ainda no âmbito da aplicação desta técnica, considera-se em geral a necessidade de proceder à abertura de 9 furos por cada m^2 com dimensões adequadas para a fixação de pregagens, de modo a que seja possível posteriormente a fixação da malha de reforço. Em fase posterior à da abertura dos furos, deve lavar-se a alvenaria com água a baixa pressão para garantir que todas as peças e argamassas soltas são removidas. Por último aplica-se o betão, devidamente cofrado (8).

A utilização do encamisamento no reforço de alvenarias melhora significativamente a ligação entre panos e confere aumentos de resistência à compressão e rigidez da parede significativos, possibilitando assim acréscimos das características mecânicas superiores comparativamente ao reboco armado (7).

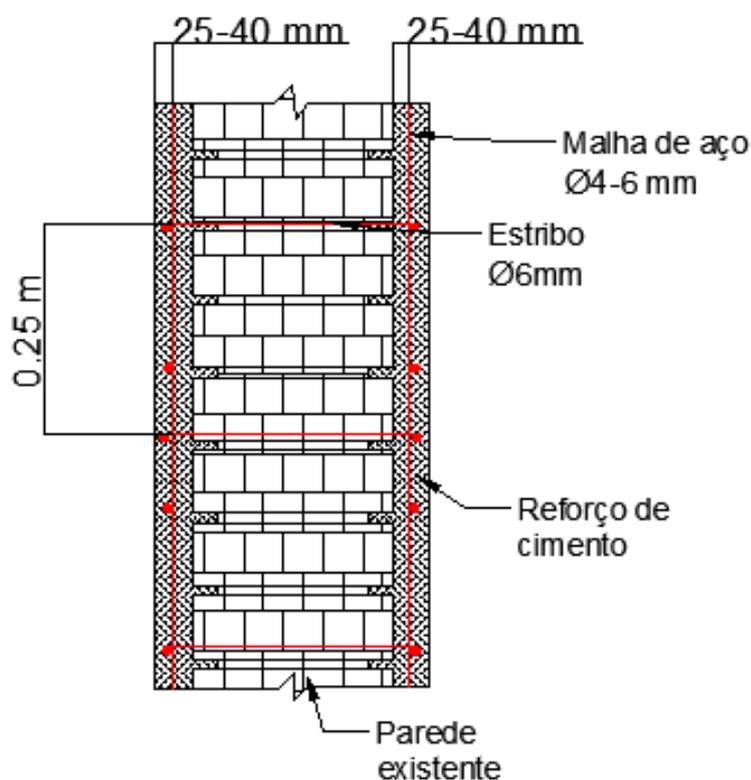


Figura 15 - Aplicação da técnica de encamisamento em ambos os lados da parede (8).

2.3.8 Reforço com materiais compósitos de matriz polimérica (FRP)

Os materiais compósitos de matriz polimérica começaram por ser utilizados na construção no reforço de estruturas de betão armado. Devido ao sucesso desta técnica no reforço deste tipo de estruturas, a utilização de FRP na reabilitação e reforço de outro tipo de estruturas, como as estruturas de alvenaria, começou a ser estudada em inúmeros países (7).

A técnica de reforço com FRP consiste na aplicação de materiais poliméricos reforçados com fibras que são colados ao suporte com ligantes de elevado desempenho. Existem diversos tipos de FRP, no entanto importa destacar os mais correntemente utilizados: aqueles que são reforçados com fibras de carbono (CFRP, mais indicado para reforço de estruturas históricas), os reforçados com fibras de aramida (AFRP) e ainda os que são reforçados com fibras de vidro (GFRP) (8).

Os FRP apresentam inúmeras vantagens e desvantagens, entre as quais é possível destacar, em termos de vantagens (7):

- Elevada resistência à tração;
- Leveza;
- Elevada resistência à compressão;
- Bom comportamento à fadiga;
- Reversibilidade;
- Baixa relaxação;
- Facilidade na aplicação.

As principais desvantagens são:

- Elevado custo;
- Comportamento frágil;
- Fraca resistência à radiação ultra-violeta;
- Fraca resistência ao fogo;
- Problemas de aderência.

Importa ainda salientar que o processo de fabrico do FRP tem grande importância nas suas propriedades mecânicas finais, devido sobretudo à orientação das fibras (ver figura 16). Assim, no caso das cintas laminadas, a sua aplicação destina-se principalmente a confinar as paredes e contrariar os esforços de flexão associados a acções horizontais perpendiculares ao plano da parede. No caso das mantas, o reforço pode contribuir para uma melhoria da resistência ao corte, evitando roturas na argamassa (8).

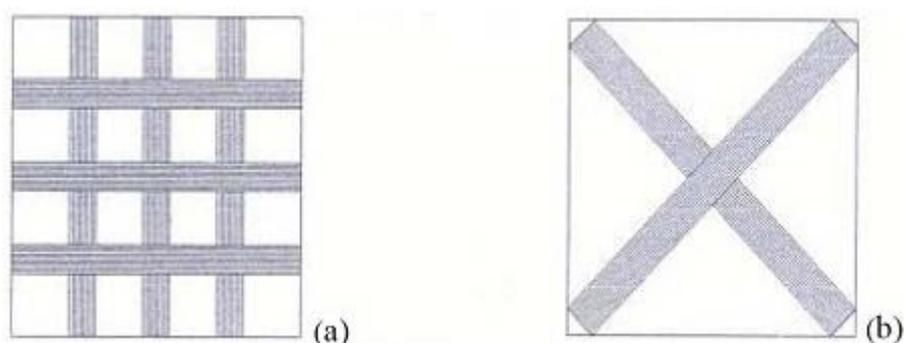


Figura 16 - Diferentes disposições de FRP (a) grelha ortogonal (b) Diagonal (8).

2.3.9 Reforço com materiais de matriz cimentícia (FRCM)

A utilização de FRCM no contexto da reabilitação e reparação de alvenarias consiste numa técnica recente e emergente. Estes materiais podem ser utilizados na reparação e reforço tanto de estruturas de alvenaria antigas como de estruturas mais recentes. O material aqui usado consiste essencialmente em argamassas de matriz cimentícia que são reforçadas com fibras discretas dispersas pela matriz. Este sistema de reforço tem por base matrizes inorgânicas e os seus principais componentes são as malhas estruturais de reforço e as matrizes cimentícias. Este material consiste na junção de uma ou mais camadas de matrizes cimentícias com fibras numa ou em várias malhas de carbono, que quando colocados em contacto com a alvenaria formam o sistema de FRCM (8) (11).

As fibras habitualmente utilizadas neste material de reforço são (8):

- Fibras metálicas, geralmente usadas em betões;
- Micro fibras sintéticas, normalmente usadas para protecção da retracção do betão ou de argamassas cimentícias. As fibras mais usadas são as de polipropileno, polietileno e poliéster;
- Macro fibras sintéticas, que são uma alternativa às fibras metálicas. Os materiais tipicamente usados são fibras de polipropileno;
- Fibras de vidro, que são usadas para modificação de estruturas de cimento em aplicações arquitectónicas;
- Fibras naturais pouco usadas em aplicações comerciais. Podem ser de sisal, cana de açúcar e ainda coco.

As principais vantagens resultantes da utilização do FRCM na construção e reparação de alvenarias são:

- Boa resistência ao calor e ao fogo;
- Boa compatibilidade com as propriedades físicas, químicas e mecânicas das alvenarias;
- Longa duração;
- Fácil instalação (semelhante à aplicação de um reboco);
- Matriz porosa (permite o transporte de ar para dentro ou para fora da estrutura);

- Reversível.

O processo de instalação do sistema de reforço baseado em FRCM (ver figura 18) consiste na aplicação, diretamente sobre a superfície da alvenaria, da camada de matriz cimentícia e da malha de reforço. Assim, primeiramente aplica-se uniformemente sobre toda a superfície uma camada de matriz cimentícia e posteriormente aplica-se, sobre esta, a malha de reforço. Sucessivamente vão-se aplicando novas camadas de matriz cimentícia e malha de reforço, habitualmente após a cura completa da camada anteriormente instalada (11).

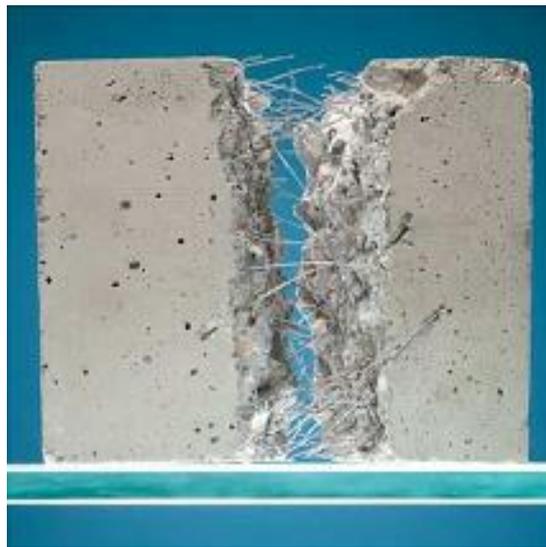


Figura 17 - Argamassa com reforço FRCM



Figura 18 - Instalação do sistema de reforço FRCM

2.4 Análise do comportamento estrutural e modelação numérica de alvenaria

A modelação numérica tem como principal objectivo traduzir a resposta de uma estrutura a um determinado conjunto de acções (forças, deformações, entre outras). Trata-se de um importante meio de auxílio no dimensionamento de alvenaria nova ou no reforço de alvenaria existente. As solicitações introduzidas num modelo numérico podem ser deslocamentos, tensões, esforços ou deformações, sendo que a resposta obtida irá depender directamente da forma, ligações na estrutura e sua rigidez, bem como das características dos materiais escolhidos para o efeito em causa. Para efectuar modelações numéricas existem diversas ferramentas que não são alvo deste estudo, no entanto há a destacar o método dos elementos finitos como a solução tipicamente usada (7).

O método dos elementos finitos consiste na resolução numérica de sistemas de equações diferenciais, tendo como principal objectivo a determinação do estado de tensão e deformação de um sólido com geometria definida pelo utilizador sujeito a acções exteriores. Através deste método podem ser realizados diversos tipos de análises, dinâmicas ou estáticas, e ainda não lineares ou lineares (12).

No caso particular de estruturas de alvenaria às quais são adicionadas camadas de reforço, torna-se particularmente importante a modelação do comportamento da interface entre o material existente e o material novo. Deste modo, em geral são modelados problemas planos ou tridimensionais, em que a interface é modelada recorrendo a elementos de interface que incorporizam as propriedades mecânicas da ligação efectuada entre o substrato existente e a nova camada de reforço (8) (13).

2.5 Rotura de materiais frágeis

Todos os materiais atingem a rotura sob determinadas condições externas. No entanto, devido à sua natureza e estrutura interna, a forma segundo a qual esta rotura se atinge não é semelhante em todos os materiais. Em geral, considerando o seu modo de rotura, os materiais podem ser classificados como dúcteis ou frágeis. No primeiro caso, estamos perante um material dúctil quando o material conserva a sua tensão mecânica para além do seu limite elástico, ou seja, suporta alterações na sua forma sem quebrar. No caso dos materiais frágeis, estes têm um comportamento contrário ao dos dúcteis, ou seja, o material tem tendência a romper sem que exista deformação significativa.

Devido à necessidade de prever a rotura de materiais sujeitos a estados de tensão multidimensionais, também é habitual recorrer-se a funções de cedência cuja geometria depende da natureza do material e do seu modo de rotura predominante. Assim, no contexto deste trabalho torna-se importante a revisão de algumas das funções de cedência clássicas que permitam prever o comportamento quer de materiais frágeis, quer de materiais dúcteis. Importa salientar que ao longo desta dissertação os materiais abordados tendem a ter um comportamento frágil, sendo portanto os critérios de rotura mais importantes aqueles que mais diretamente estão relacionados com este tipo de materiais, tais como o de Rankine, Mohr e Mohr-Coulomb. Importa ainda rever os conceitos essenciais que fundamentam o modo de rotura que habitualmente se observa em materiais frágeis, que são essencialmente abordados pela Mecânica da Fratura.

A mecânica da fractura está inteiramente ligada ao estudo da propagação de fendas e possível cedência dos materiais frágeis. Este mecanismo usa métodos analíticos de mecânica para estabelecer mecanismos em termos de equilíbrio de forças e energia que regulam a abertura de fendas e sua propagação, e permitem ainda experimentalmente caracterizar a resistência dos materiais à fractura (8).

Hoje em dia a mecânica da fractura é uma importante ferramenta que nos permite prever o comportamento mecânico dos materiais. Assim, aplicando a física, os esforços, teorias de elasticidade e plasticidade, conseguimos prever o que poderá acontecer em materiais reais com base em ensaios à escala reduzida.

Existem três modos de propagação de fendas distintos (figura 19):

Modo I – modo de abertura, as tensões normais em relação ao plano da fenda provocam a abertura e propagação da fenda;

Modo II – modo deslizante, o esforço de corte actua paralelo ao plano de fenda e perpendicular à frente da fenda, determinando assim a propagação da fenda por deslizamento;

Modo III – modo rasgado, o esforço de corte actua paralelo ao plano de fenda e paralelo à frente da fenda, causando o rasgo para lados opostos do material e assim a respectiva fenda.

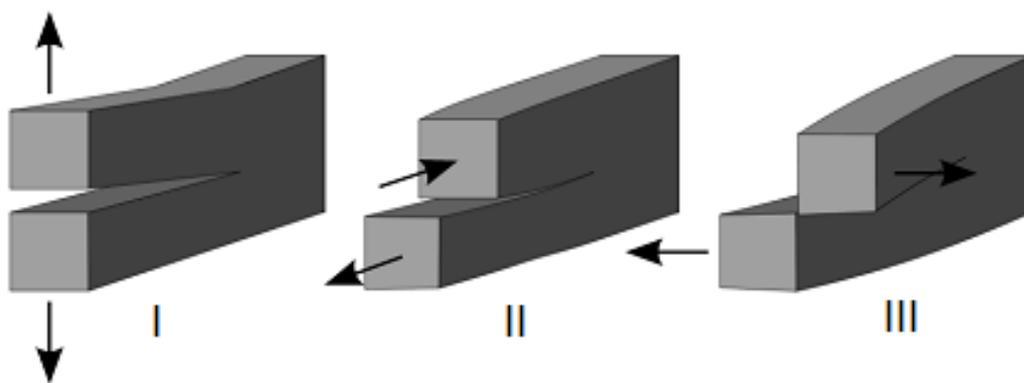


Figura 19 - Diferentes modos de rotura obtidos através da mecânica da fractura.

No contexto deste trabalho, dado que se pretende caracterizar o comportamento da interface entre o material de reforço e o substrato existente, tomam especial relevância os modos de rotura I e II.

2.5.1 Rankine

O critério de Rankine, ou também designado como critério de rotura de tensão máxima, é normalmente usado para caracterizar materiais frágeis. Este critério define que o material atinge a rotura quando a tensão principal máxima atine tanto a resistência à tracção uniaxial como a resistência à compressão uniaxial, respectivamente σ_t e σ_c , (8).

$$-\sigma_c < \{\sigma_1, \sigma_2\} < \sigma_t \quad (2.1)$$

Graficamente este critério é dado por (figura 20):

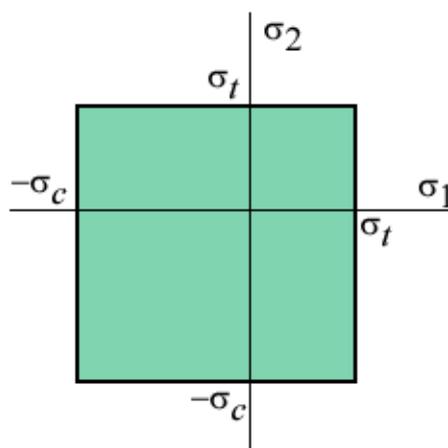


Figura 20 - Critério de cedência de Rankine.

2.5.2 Tresca

O critério postulado por Henri Tresca em 1864 é baseado em resultados experimentais, que admite que a deformação plástica num material ocorre sempre que a tensão tangencial máxima atinge um determinado valor. Importa ainda referir que este critério é adoptado para materiais que apresentem um comportamento dúctil (14).

Este critério também é designado por teoria da máxima esforço de corte (MSST) ou ainda Tresca-Guest (TG) e é dado pela seguinte expressão matemática (2.2) (8) (15):

$$\frac{1}{2} \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) = \frac{1}{2} \sigma_y \quad (2.2)$$

Onde, σ_1 , é a resistência à tracção definida pelo círculo de Mohr.

2.5.3 Von Mises

Von Mises formulou um critério de cedência em 1913, e é fundamentalmente usado para estimar a plastificação de materiais dúcteis. Este critério sugere que a cedência de um material ocorre quando o segundo invariante das tensões de desvio, J_2 , atinge um valor crítico, sendo dado pela seguinte expressão (2.3):

$$\sqrt{J_2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \times \varphi(\alpha) = 0 \quad (2.3)$$

Onde, $\varphi(\alpha)$, depende do parâmetro de endurecimento (α) é o raio da superfície de cedência (14).

Assim, o critério de Von Mises afirma que a rotura ocorre quando a energia de distorção atinge a mesma energia para produção da rotura em tensão uniaxial. Isto pode ser expresso matematicamente como (ver expressão 2.4) (14):

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2} \times ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad (2.4)$$

2.5.4 Mohr

O critério de cedência de Mohr representa a rotura de um material tendo em conta os círculos de Mohr obtidos para diferentes níveis de esforços. Este critério pode ser representado

matematicamente por (no caso de se tratar de critério de Mohr hiperbólico, ver expressões 2.5 e 2.6) (13) (8):

$$f = \sigma_T^2 - (c - \sigma \times \tan \varphi)^2 + (c - \chi \times \tan \varphi)^2 \equiv \quad (2.5)$$

$$\sigma_T = \sqrt{(c - \sigma \times \tan \varphi)^2 - (c - \chi \times \tan \varphi)^2} \quad (2.6)$$

Onde,

c – coesão [MPa]

φ – ângulo de atrito [°]

σ – tensão normal [MPa]

χ – resistência à tracção [MPa]

2.5.5 Mohr Coulomb

A teoria de Mohr-Coulomb é sintetizada por um modelo matemático que permite observar a resposta de vários materiais quando sujeitos a esforços de corte, nomeadamente materiais frágeis. Este modelo é usado na engenharia de estruturas na determinação da carga de rotura de estruturas constituídas por materiais frágeis.

Todos os materiais apresentam diferentes valores característicos de resistência quando sujeitos a esforços de compressão e tracção. Quando sujeitos a esforços de compressão, verifica-se que existe uma maior resistência, pois os vazios que possam existir na superfície de rotura tendem a ser colmatados. Por outro lado, quando estamos perante esforços de tracção existe uma diminuição da resistência, explicando este facto com a presença de inclusões e vazios existentes no corpo material em análise (14).

Assim, o critério de Mohr-Coulomb é usado para representar o comportamento dos materiais que, de forma simplificada, possuem atrito interno e é dado pela expressão (2.7) (14):

$$\tau = \sigma \times \tan(\varphi) + c \quad (2.7)$$

Onde,

σ – tensão normal [MPa]

φ – ângulo de atrito [°]

c – coesão [MPa]

Graficamente e no plano, o critério de Mohr-Coulomb é representado por duas linhas rectas aproximadas à curva de Mohr (figura 21 Figura 21).

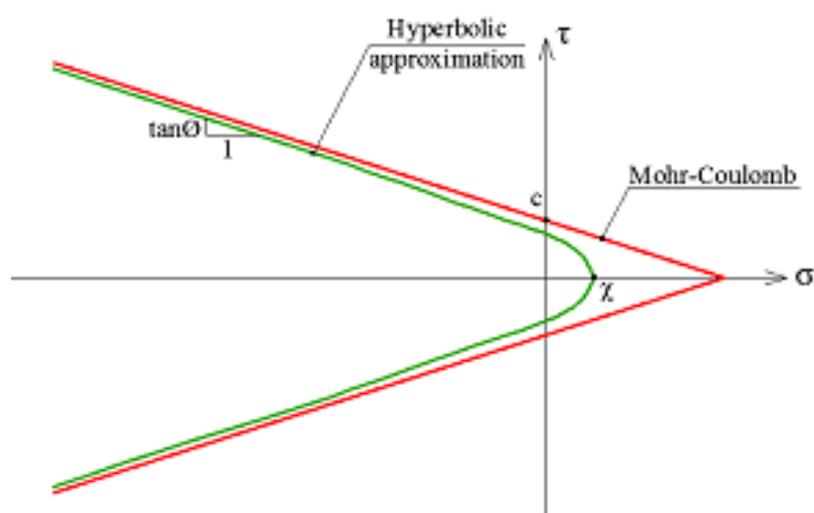


Figura 21 - Representação gráfica do critério de cedência de Mohr.

2.5.6 Drucker-Prager

O critério de cedência de Drucker-Prager (figura 22) é semelhante ao critério de Von Mises apresentado anteriormente. Este critério é mais frequentemente usado em betão onde as tensões normais e de corte podem determinar a rotura. Importa referir que este critério é uma aproximação suave da superfície de Mohr-Coulomb e é dado matematicamente por (ver expressão 2.8) (16) (14) (8):

$$f = 3 \times \alpha \times \sigma_m + \sqrt{J_2} - k' = 0 \quad (2.8)$$

Em que α e k' são constantes do material que dependem do ângulo de atrito (φ) e coesão (c), e dados por (expressões 2.9 e 2.10) (14) (16):

$$\alpha = \frac{2 \times \sin \varphi}{\sqrt{3} \times (3 - \sin \varphi)} \quad (2.9)$$

$$k' = \frac{6c \times \cos \varphi}{\sqrt{3} \times (3 - \sin \varphi)} \quad (2.10)$$

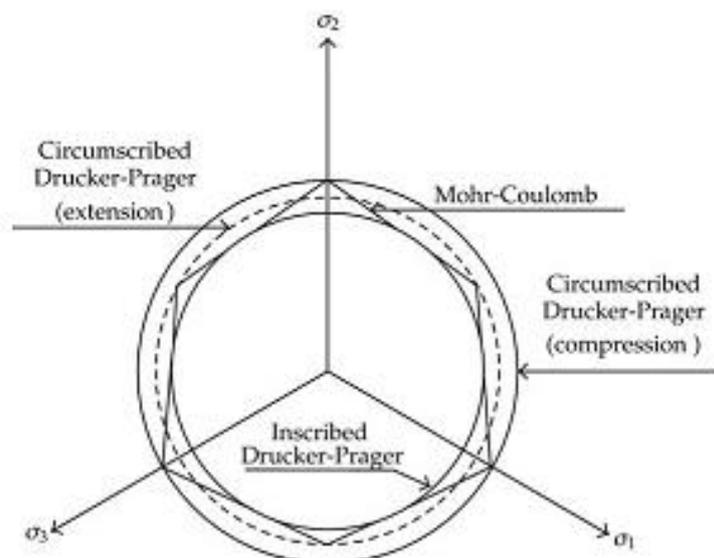


Figura 22 - Superfícies de rotura de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager (8).

Tendo em conta os critérios apresentados, no âmbito deste trabalho os critérios de rotura mais importantes são os que se referem aos materiais frágeis, nomeadamente o critério de Rankine, Mohr e Mohr-Coulomb, uma vez que os materiais abordados tendem a ter um comportamento frágil.

3 Propriedades mecânicas do ARMO-crete

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve introdução ao material usado no âmbito desta dissertação (ARMO-crete), explorando as suas principais características e aplicações. Posteriormente pretende-se mostrar os resultados obtidos para a caracterização das propriedades mecânicas do material, isto é, a sua resistência à flexão e compressão. Por último realizou-se o ensaio de pull-off para determinar a adesão do ARMO-crete quando aplicado em superfícies de granito.

3.1 Descrição geral do material

O Armo-crete consiste num sistema de reforço estrutural criado pela empresa S&P, baseado numa malha de reforço em carbono e numa matriz de natureza cimentícia. A S&P fabrica e desenvolve sistemas de reforço baseados em fibras de carbono e vidro e em matrizes cimentícias e poliméricas, produzindo também polímeros reforçados com fibras (FRP's) para reforço de estruturas de betão, pavimentos rodoviários e ainda pavimentos aeroportuários. A S&P iniciou a sua actividade em 1985 na Suíça, tendo hoje em dia fábricas na Polónia, Suíça, Áustria e em Elvas, Portugal (8).

De acordo com a empresa fornecedora, o “Armo-crete mortar type w” é uma argamassa de elevada resistência, em que aquando da aplicação de rede polimérica apenas é usada a argamassa como fixação, que pode ser aplicada na reparação de estruturas de betão, construção de tuneis, e em outras reparações. Ainda é importante referir que este material é constituído por ligantes inorgânicos, fibras, agregados seleccionados, polímeros e ainda aditivos. A sua aplicação pode ser realizada de forma manual ou usando mecanismos de projecção mecânica. Pode ainda ser aplicado em zonas interiores ou exteriores, sendo importante respeitar a sua espessura mínima. Com estas características podemos considerar que esta argamassa satisfaz os requisitos para aplicação neste estudo, que consiste no reforço de paredes de alvenaria de granito através da aplicação de camadas de reforço, tendo sido seleccionado no âmbito desta dissertação.

Como principais características a salientar deste sistema de reforço temos a sua alta aderência à maioria dos betões, a sua resistência aos sulfatos, elevada resistência contra o fogo e geada, o facto de não conterem cloretos e a sua fácil aplicação.

Devido à escassa informação acerca da aderência deste material às superfícies de granito, faz sentido estudar este comportamento no âmbito deste estudo.

Tabela 1 - Propriedades do ARMO-crete.

ARMO-crete w	
Densidade	2050 kg/m ³
Quantidade de água	15 – 17 % por peso
Resistência à compressão	> 45 MPa (28 dias)
Resistência à flexão	>6 MPa (28 dias)
Módulo de elasticidade	≤30 GPa
Espessura recomendada	5 – 50 mm

3.2 Ensaio de flexão

As propriedades mecânicas da matriz cimentícia são importantes para um estudo aprofundado do comportamento estrutural do reforço. Deste modo, procedeu-se à caracterização do comportamento em flexão do ARMO-crete, segundo a norma EN 1015-11:1999.

Assim, foram executados provetes com as dimensões de 40x40x160 mm³, para serem testados após 28 dias de cura. A cura dos provetes foi realizada numa camara climática cujas condições de temperatura se encontravam entre os 20 e os 25°C e de humidade relativa de 50 a 60 %. Os provetes foram desmoldados 2 dias após a sua moldagem. O esquema adoptado durante o ensaio é demonstrado na figura 23 e 25.

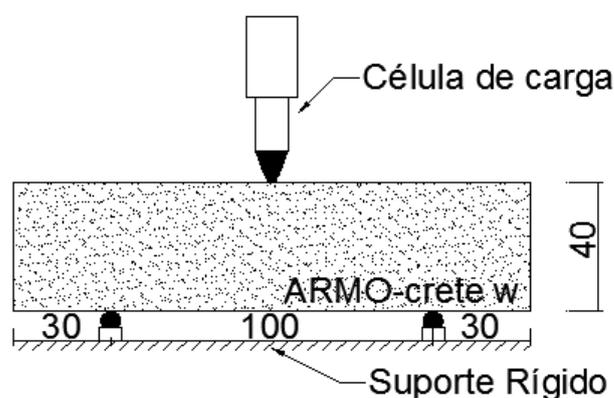


Figura 23 – Esquema do ensaio de flexão (dimensões em mm).

Os ensaios de flexão foram realizados recorrendo ao equipamento “Lloyd EZ50”, impondo uma velocidade de deslocamento vertical constante de 2.5 µm/s ao atuador posicionado a meio vão dos prismas. Assim, cada prisma foi colocado na máquina de ensaio, centrado em relação aos apoios externos de rolete, afastados 100 mm. De seguida (figura 24) mostram-se os resultados obtidos através dos ensaios dos vários prismas num gráfico Força vs flecha.

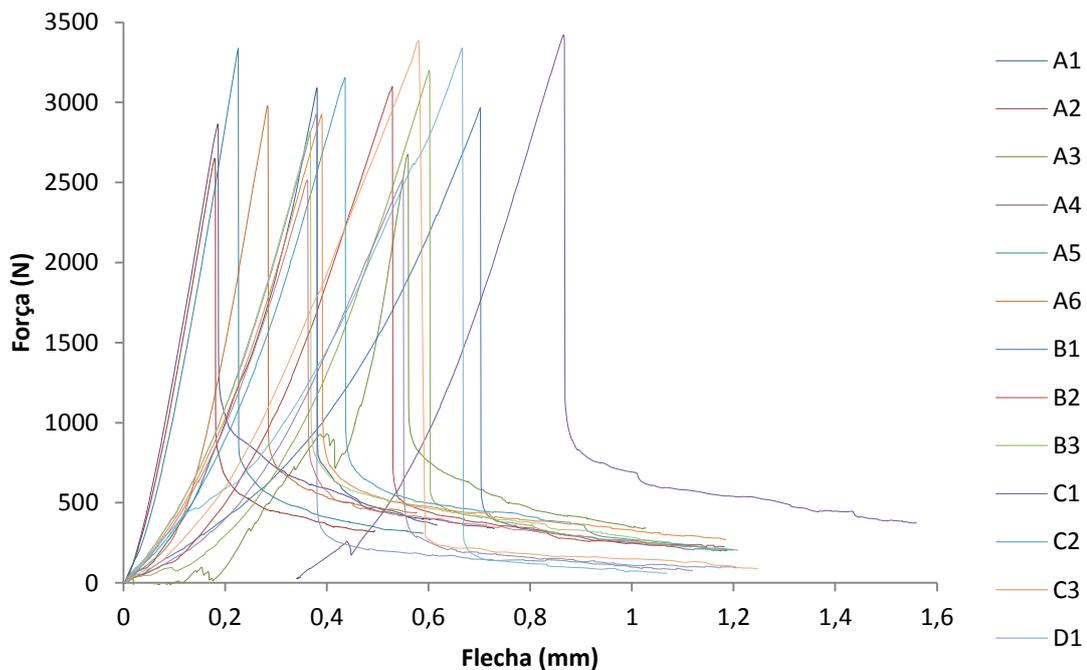


Figura 24 - Ensaio de flexão - Força vs Flecha.

Analisando a resposta força vs flecha é possível distinguir duas fases distintas da resposta, sendo que o pico de carga faz a separação entre elas. Numa primeira fase obtemos um comportamento aproximadamente linear crescente, enquanto que numa segunda fase, após o pico, a curva é não linear e caracteriza-se por um acentuado decréscimo da carga, acompanhada pela abertura e propagação da fenda a meio da secção.

Finalizado o ensaio de flexão, assumindo que a distribuição de tensões normais na secção é linear até à rotura é possível determinar-se a resistência à flexão equivalente através da seguinte expressão (3.1):

$$R_f = \frac{1.5 * F * l}{b^3} \quad (3.1)$$

Em que:

R_f – Resistência à flexão (N/mm^2)

F – carga aplicada no centro do prisma na rotura (carga de pico) (N)

l – distancia entre apoios (mm)

b – lado da secção quadrada do prisma (mm)

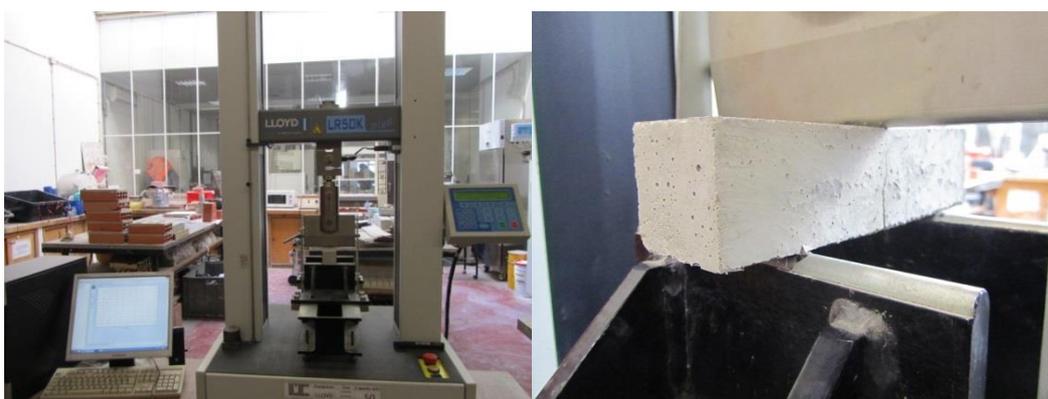


Figura 25 - Máquina de ensaio; Abertura de fenda no provete.

Através dos ensaios realizados em todos os provetes foi possível obter os resultados que a seguir se apresentam (tabela 2) e posteriormente se analisam, sendo feita uma distinção entre provetes de acordo com o tipo de superfície do granito, bem como de acordo com o dia de mistura da argamassa. Deste modo, os provetes com a letra “A” correspondem à superfície de granito lisa, os “B, C e D” correspondem aos de superfície tratada com jato de areia e bujardada respetivamente, e os designados com a letra “E” correspondem aos provetes preparados para os ensaios de pull-off.

Tabela 2 - Resultados obtidos através dos ensaios de flexão.

Provetes	Tempo [dias]	c [mm]	l [mm]	h [mm]	F [N]	R_f [MPa]	
A	28	1	160,27	42,32	40,35	3090,1	6,12
		2	160,2	42,52	40,2	2651	5,17
		3	160,73	42,16	39,66	2676,1	5,36
		4	160,85	39,85	39,7	2865,7	6,79
		5	159,82	40,86	40,16	3337,8	7,34
		6	160	40,72	40,31	2978,6	6,62
B	28	1	160,25	39,63	39,73	2966,6	7,15

	2		160,28	40,06	40,03	3099,3	7,23
	3		160,21	40,29	41,11	3199	7,34
	1		161,17	40,91	40,46	3420,9	7,49
C	2	28	160,48	40,78	40,33	3154,4	6,98
	3		160,86	40,96	39,81	2925,8	6,39
	1		160,63	39,11	38,85	2927,4	7,34
D	2	28	159,48	39,13	38,89	2514,8	6,30
	3		159,52	39,55	39,09	2820,9	6,84
	1		159,06	39,73	40,15	2516,7	6,02
E	2	28	159,96	40,4	39,73	3340,3	7,60
	3		160	40,1	39,44	3374,7	7,85

3.3 Ensaio de compressão

A caracterização do comportamento do ARMO-crete à compressão é também fundamental para complementar a informação relativa aos parâmetros mecânicos da matriz que constitui o sistema de reforço. Deste modo, para cada uma das séries apresentadas previamente realizaram-se ensaios de compressão para determinação da resistência à compressão, segundo a norma EN 1015-11:1999.

O ensaio é realizado sobre provetes aproximadamente cúbicos com dimensões de 40x40x40 mm³, sendo que os provetes para este ensaio resultam de duas metades obtidas após a realização dos ensaios de flexão. Os ensaios foram executados em controlo de força, aplicando-se uma força progressivamente crescente a uma velocidade constante de 0.4 kN/s até se produzir a rotura do provete. Os ensaios foram executados num equipamento do tipo “ELE autotest”. É importante salientar que este equipamento não permite a gravação de dados, pelo que os resultados foram registados de forma manual. O esquema de ensaio é apresentado na figura 26.

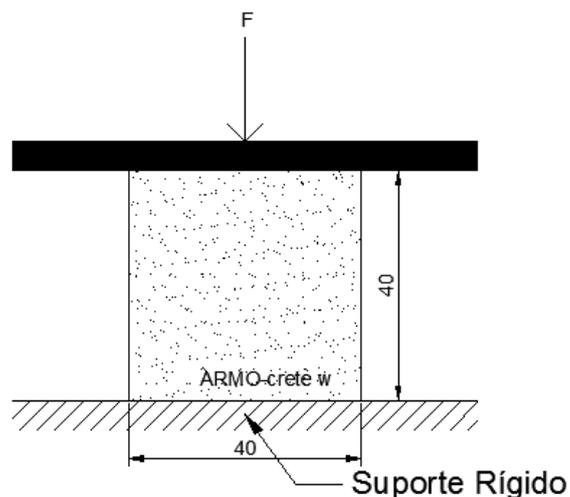


Figura 26 - Esquema do ensaio de compressão (dimensões em mm).

Considerando que o resultado obtido para cada prisma resulta do ensaio de duas metades, a resistência à compressão (R_c) em MPa é dada por (3.2):

$$R_c = \frac{F_1 + F_2}{2 \times 1600} \quad (3.2)$$

Onde, F_1 e F_2 representam as forças aplicadas em cada metade do provete original (N) no instante da rotura.



Figura 27 - Ensaio de compressão

Os resultados obtidos encontram-se sintetizados na tabela 3. Estes resultados serão analisados e discutidos numa secção subsequente.

Tabela 3 - Resultados obtidos nos ensaios de compressão.

Provetes	Tempo [dias]	F ₁ [kN]	F ₂ [kN]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	R _c [MPa]
A	1	65,22	49,33	38,19	28,89	33,54
	2	39,39	59,51	23,04	34,82	28,93
	3	72,5	67,79	43,36	40,54	41,95
	4	54,57	51,69	34,49	32,67	33,58
	5	61,8	64,59	37,66	39,36	38,51
	6	63,69	56,94	38,80	34,69	36,75
B	1	66,75	54	42,39	34,30	38,35
	2	54,8	55,82	34,17	34,81	34,49
	3	61,73	52,08	37,27	31,44	34,36
C	1	45,66	49,32	27,59	29,80	28,69
	2	53,07	51,75	32,27	31,47	31,87
	3	57,47	50,9	35,24	31,22	33,23
D	1	52,01	49,26	34,23	32,42	33,33
	2	48,33	44,21	31,76	29,05	30,41
	3	48,65	48,27	31,47	31,22	31,35
E	1	71,1	53,28	44,57	33,40	38,99
	2	58,43	61,58	36,40	38,37	37,38
	3	74	51,43	46,79	32,52	39,65

3.4 Ensaio de arrancamento por tracção (pull-off)

Por forma a complementar a informação relativa ao comportamento mecânico da camada de Armo-crete quando aplicada na superfície de paredes de alvenaria granítica, procedeu-se à caracterização do comportamento de aderência da argamassa no estado endurecido por intermédio de ensaios de arrancamento ou *pull-off*. Estes ensaios foram realizados com base na norma EN 1015-12:2000.

Para a realização destes ensaios executaram-se provetes de 35x35 mm² para três tipos de acabamento de superfície diferentes da pedra de granito: superfície serrada, superfície com tratamento de jacto de areia e superfície com tratamento tipo “bujardado”. Sobre cada tipo de pedra foi aplicada uma camada de cerca de 2.5 cm de ARMO-crete.

Após 28 dias de cura da camada de argamassa aplicada sobre a pedra procedeu-se à preparação do ensaio de pull-off. Primeiramente foi necessária a marcação de nove pontos com o afastamento conveniente, sobre os quais se iria proceder ao ensaio. Em seguida, procedeu-se à abertura de ranhuras circulares com aproximadamente 5 cm de diâmetro sobre

cada ponto marcado previamente com recurso a um equipamento de corte com água que introduz baixas vibrações nos provetes. Concluída a aberturas de todas as ranhuras procedeu-se á limpeza da superfície. Posteriormente, foi necessária a colagem de pastilhas metálicas em cada zona de ensaio. A colagem destas peças metálicas à argamassa foi concretizada com recurso a uma resina epoxy comercial com dois componentes, Sikadur® 32. Esta resina é especialmente formulada para colagens de betão com chapas metálicas, tem uma elevada resistência à compressão e tração e conduz a um endurecimento rápido (17).



Figura 28 - Abertura de ranhura e colagem de pastilha.

Para a realização deste ensaio, usou-se o equipamento “Proceq dy-216”, com uma força máxima de tracção de 16 kN e uma velocidade de aplicação de carga de 40N/s. O ensaio consiste na aplicação de força de tração sobre a peça metálica previamente colada à argamassa. É ainda importante, antes de iniciar o ensaio, proceder ao nivelamento do equipamento.



Figura 29 - Equipamento utilizado no ensaio pull-off.

Após a execução de cada ensaio foi possível obter a tensão de adesão através da seguinte equação (3.3):

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3.3)$$

Em que:

F_u – força máxima (N) atingida durante o ensaio de arrancamento;

A – área (mm^2).

Os resultados obtidos encontram-se apresentados nas tabelas 4, 5 e 6 incluindo, para cada ensaio, área da superfície de rotura, o modo de rotura, a força máxima atingida durante o ensaio e a correspondente tensão de adesão.

Analisando os resultados obtidos, podemos constatar que se verificam dois modos de rotura diferentes, por adesão e coesão (ver figura 30). A adesão dá-se quando temos uma desagregação da argamassa e esta fica aderida à pedra de granito. Já a coesão dá-se quando temos uma desagregação da pedra de granito e parte desta permanece na argamassa.

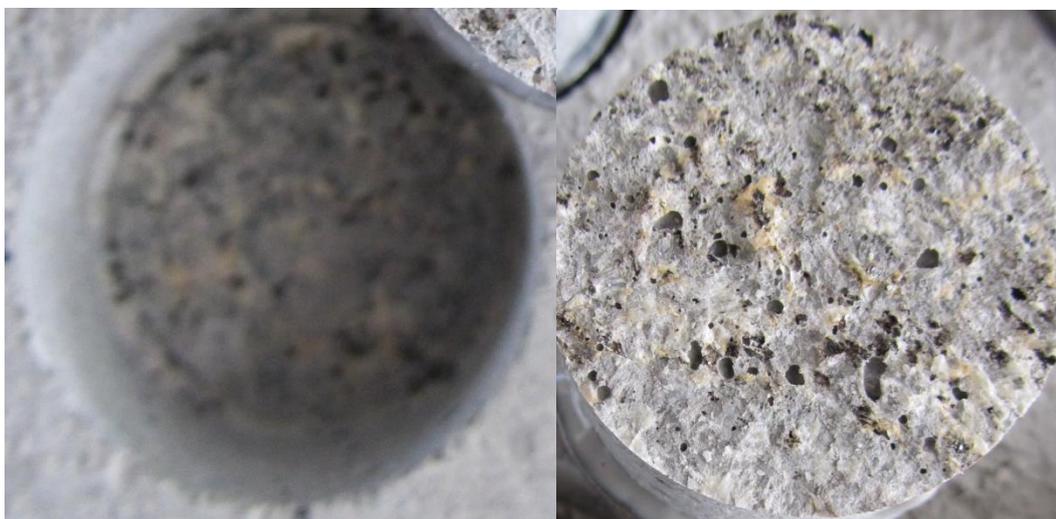


Figura 30 - Rotura por adesão e coesão.

Tabela 4 - Resultado obtido no ensaio de pull-off superfície serrada.

Superfície serrada					
Nº	Diâmetro [mm]	Área [mm²]	F_u [kN]	Modo de rotura	f_u [MPa]
1	44,49	6218,34	1,63	Adesão	0,26
2	44,47	6212,75	2,42	Adesão	0,39
3	44,34	6176,48	2,11	Adesão	0,34
4	44,43	6201,58	2,06	Adesão	0,33
5	44,25	6151,43	2,14	Adesão	0,35
6	44,19	6134,76	1,5	Adesão	0,24
7	44,29	6162,56	0,72	Adesão/Coesão	0,12
8	44,29	6162,56	1,8	Adesão	0,29
9	44,59	6246,33	1,8	Adesão	0,29

Tabela 5 - Resultado obtido no ensaio de pull-off superfície jato de areia.

Superfície jato de areia					
Nº	Diâmetro [mm]	Área [mm²]	F_u [kN]	Modo de rotura	f_u [MPa]
1	44,56	6237,93	2,66	Adesão	0,43
2	44,74	6288,42	1,99	Adesão	0,32
3	44,31	6168,13	2,47	Adesão	0,40
4	44,69	6274,38	2,16	Adesão	0,34
5	44,51	6223,94	2,29	Adesão	0,37
6	44,53	6229,53	2,52	Adesão	0,40
7	44,49	6218,34	2,21	Adesão	0,36
8	44,67	6268,76	1,74	Adesão	0,28
9	44,24	6148,65	2,03	Adesão	0,33

Tabela 6 - Resultado obtido no ensaio de pull-off superfície bujardada.

Superfície bujardada					
Nº	Diâmetro [mm]	Área [mm²]	F_u [kN]	Modo de rotura	f_u [MPa]
1	44,34	6176,48	1,41	Coesão	0,23
2	44,44	6204,37	1,43	Coesão	0,23
3	44,5	6221,14	1,35	Coesão	0,22
4	44,39	6190,42	0,85	Coesão	0,14
5	44,22	6143,10	0,95	Coesão	0,15
6	44,27	6157,00	1,01	Coesão	0,16
7	44,35	6179,27	0,64	Coesão	0,10
8	44,37	6184,84	0,66	Coesão	0,11
9	44,58	6243,53	1,44	Coesão	0,23



Figura 31 - Rotura obtida na superfície serrada, jato de areia e bujardada.

3.5 Discussão de resultados

De forma a caracterizar de modo abrangente a argamassa utilizada no âmbito desta dissertação, procedeu-se à realização de três tipos de ensaios: ensaios de flexão e compressão e pull-off, ensaios todos realizados após 28 dias de cura.

Para este tempo de cura foram obtidas as seguintes médias dentro de cada tipo de provetes, conforme os resultados já apresentados acima (tabela 7).

Tabela 7 - Resultados obtidos nos ensaios de flexão e compressão.

Ensaio	Provetes	Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Coefficiente de variação (%)
Flexão	A	6,23	0,85	13,60
	B	7,24	0,09	1,30
	C	6,95	0,55	7,97
	D	6,83	0,52	7,65
	E	7,16	0,99	13,87
Compressão	A	35,54	4,54	12,76
	B	35,73	2,27	6,34
	C	31,26	2,33	7,45
	D	31,69	1,49	4,70
	E	38,68	1,17	3,02

Assim, segundo estes dados e em comparação com as características técnicas fornecidas pela empresa produtora do ARMO-crete, podemos verificar que no que diz respeito à flexão os valores obtidos se encontram nos parâmetros fornecidos pela marca em que a resistência à flexão aos 28 dias era superior a 6 MPa. Por outro lado, no que diz respeito aos ensaios de

compressão, os valores obtidos situam-se na casa dos 35 MPa, enquanto que segundo a S&P aos 28 dias deveríamos obter valores de resistência à compressão na ordem dos 45 MPa.

Relativamente aos ensaios de pull-off (tabela 8), obteve-se os seguintes valores médios e respectivos coeficientes de variação em relação aos resultados já apresentados acima.

Tabela 8 - Valores obtidos nos ensaios de pull-off.

Superfície	Média [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coefficiente de variação (%)
Serrada	0,29	0,08	29,24
Jato de areia	0,36	0,05	14,13
Bujardada	0,17	0,06	32,44

Segundo estes resultados à primeira vista podemos reparar logo que não existe uma grande coerência entre eles, porque onde obtemos maior valor de aderência é na superfície intermédia. No entanto, através de uma análise mais atenta dos valores obtidos, podemos concluir que na superfície bujardada devido ao tratamento mais agressivo que a superfície foi sujeita, o modo de rotura dá-se por coesão, ou seja o granito resiste menos à tração comparativamente à argamassa. Também aqui podemos ter influência do maior número de vazios presente nesta superfície.

Relativamente às outras duas superfícies, na superfície serrada temos uma perfeita separação entre o granito e argamassa, enquanto que na superfície em jato de areia temos uma rotura mais na argamassa, também aqui o numero de vazios poderá ter influencia visto que na superfície serrada como não existem vazios a aderência também não é boa, enquanto que na superfície em jato de areia como o numero de vazios é baixo ajuda na aderência entre materiais.

4 Comportamento mecânico da interface entre argamassa de ARMO-crete e granito

Este capítulo é dedicado à caracterização mecânica da interface entre o granito e o ARMO-crete, que consiste no material de reforço de matriz cimentícia. Para este propósito, o capítulo inicia com uma breve introdução à caracterização experimental do comportamento mecânico ao corte, baseado em pesquisas efectuadas e referências bibliográficas. Subsequentemente faz-se a descrição dos procedimentos adotados na preparação dos provetes e na realização dos ensaios de caracterização mecânica ao corte. Por último discutem-se os resultados obtidos e sintetizam-se as principais conclusões do presente capítulo.

4.1 Ensaios para caracterização experimental do comportamento ao corte da interface

A caracterização da resposta mecânica da interface entre materiais de construção quando sujeitos a cargas de corte é particularmente importante quando se envolve diferentes materiais. Além disto, devido à conjuntura económica e social vivida nos dias de hoje, esta questão torna-se ainda mais importante no âmbito da reconstrução das edificações existentes, sendo necessário analisar a compatibilidade entre os materiais de forma a que seja economicamente rentável a aplicação de determinado material de reforço em determinada estrutura.

Para este efeito, existem diversos tipos de ensaios que nos permitem conhecer melhor as características da interface entre materiais, avaliando os parâmetros de resistência e o comportamento de aderência entre unidades distintas.

De forma a caracterizar o comportamento ao corte da interface entre materiais distintos, entre outros são conhecidos três ensaios frequentemente usados para esse efeito: “*Couplet test*”, “*Van der Pluijm test*”, “*Triplet test*”. No que diz respeito ao “*Couplet test*” (ver figura 32), estudos revelam que este oferece a melhor aproximação de esforços de corte e normais ao longo de toda a interface, comparativamente com os outros ensaios. No entanto a complexidade da sua configuração prejudica a sua adopção como ensaio mais frequentemente usado (8) (18).

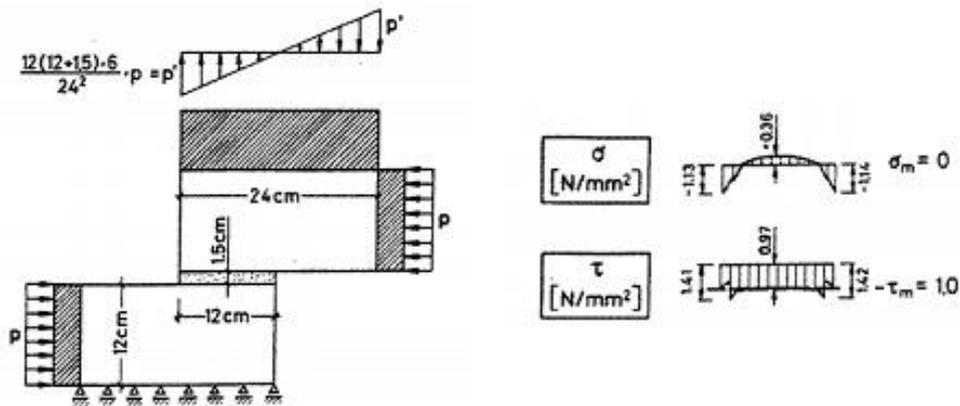


Figura 32 - "Couplet test" (19).

Relativamente ao ensaio "Van der Pluijm test" (figura 33), a análise numérica da configuração do ensaio incluindo geometria e condições de apoio conduz a uma tensão de corte quase uniforme, no entanto existe uma maior diferença entre o valor mínimo e máximo da tensão normal na interface entre os materiais (19) (18).

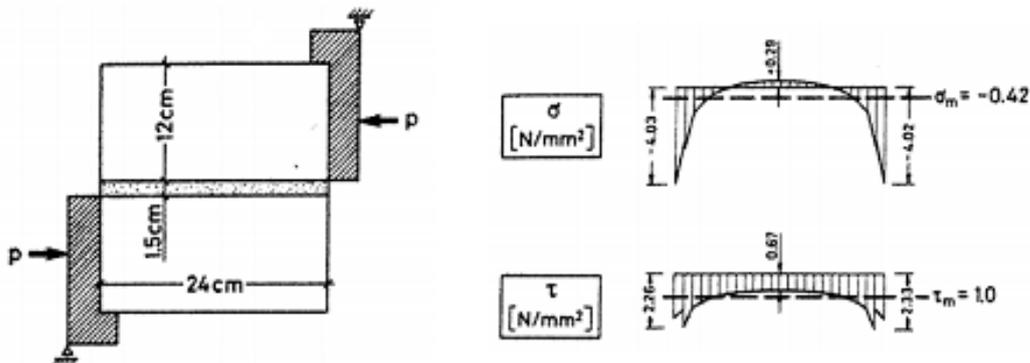


Figura 33 - "Van der Pluijm test" (19).

Por ultimo, no caso do ensaio "Triplet" (figura 34), a distribuição de tensões de corte pode ser afectada por uma distribuição não uniforme e ainda, as medidas dos esforços de corte apenas são obtidos se os esforços de flexão aplicados às amostras forem minimizados. Isto é conseguido através de uma redução da excentricidade das reacções o mais próximo possível da interface. A situação aqui descrita encontra-se prevista no método de ensaio padrão, segundo a norma EN 1052-3:2002 (18).

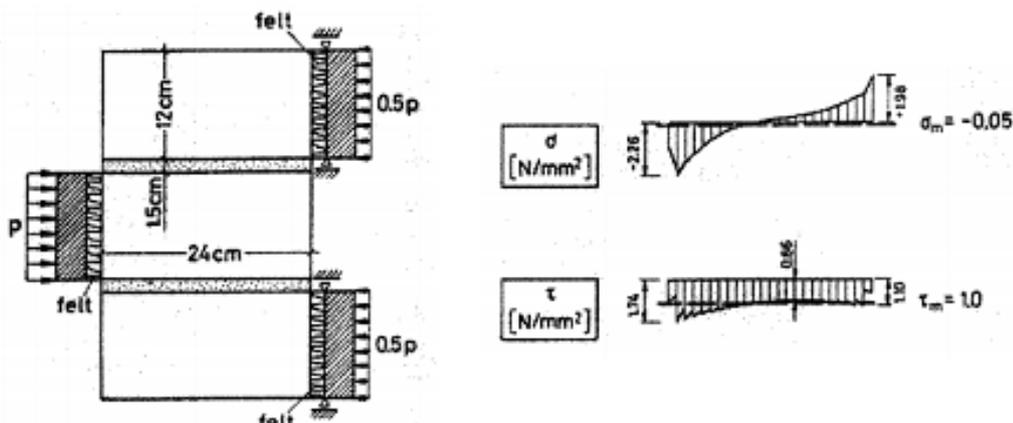


Figura 34 - "Triplet test" (19).

Ainda relativamente a ensaio de corte, importa referir uma alternativa ao ensaio proposto por Van der Pluijm (18) (figura 35). Aqui, os provetes são colocados entre duas bases finas de aço ligadas entre si por parafusos, sendo assim transmitidas as forças de corte para o provete. Adicionalmente, entre as placas de aço e o provete, são colocadas duas camadas de folhas de Teflon de forma a reduzir os efeitos de atrito. Adicionalmente, conectam-se folhas de aço às placas de aço de forma a concentrar a força de corte o mais próximo possível da interface, proporcionando assim uma distribuição de tensões mais uniforme e prevenindo também momentos fletores.

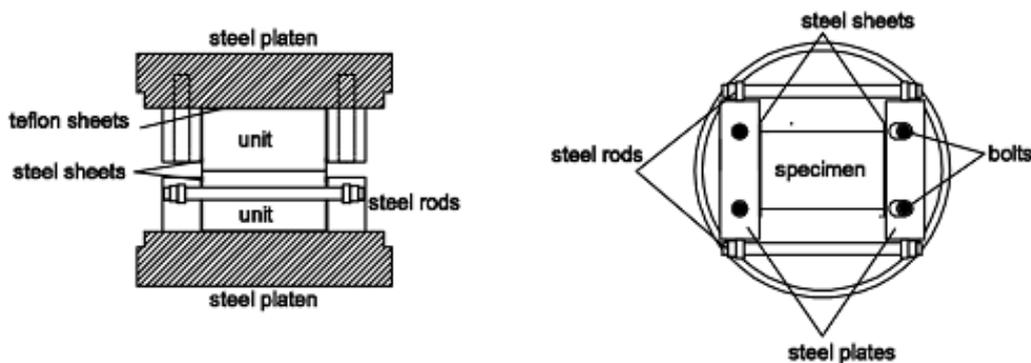


Figura 35 - Setup proposto por Graça Vasconcelos (18).

4.2 Programa experimental: preparação de provetes

Considerando que a interface entre os materiais é uma zona crítica no comportamento estrutural, e que no âmbito desta dissertação se trata o reforço de estruturas de alvenaria, o material escolhido para representar a parede de alvenaria existente foi o granito.

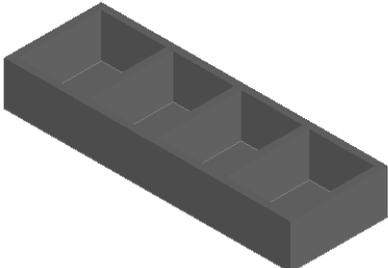
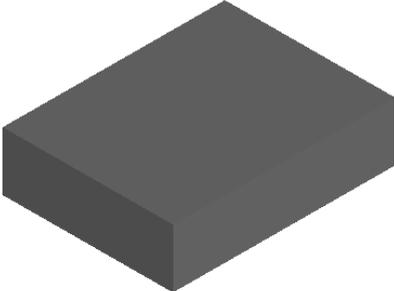
Assim, por forma a representar os diferentes tipos de acabamento superficial que a parede pode apresentar, optou-se pela utilização de três tipos distintos de acabamento superficial final: superfície serrada, superfície com acabamento em jacto de areia e superfície bujardada.

A preparação dos provetes realizou-se no laboratório de estruturas da Universidade do Minho, LEST, exceto o acabamento dado à superfície da pedra e o corte dos blocos nos provetes, que foi realizado numa empresa especializada. Importa ainda referir que a argamassa utilizada na construção dos provetes foi o ARMO-crete e foi adoptado um rácio de água/argamassa de 14% com vista a obter-se uma boa trabalhabilidade. Durante a construção dos provetes para a realização dos ensaios de corte, de modo a proceder à caracterização das propriedades mecânicas da argamassa, foram também preparados provetes com as dimensões de 40x40x160 m, como já foi enunciado no capítulo 3.

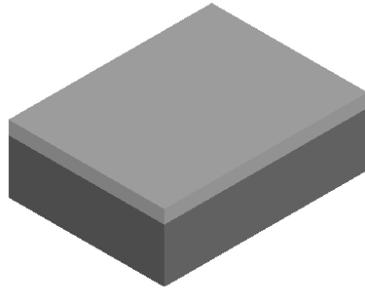
Os provetes para a realização dos ensaios de corte foram construídos com recurso a um molde reutilizável de poliestireno extrudido previamente construído, com quatro zonas para a construção de quatro blocos de 230x300x160 mm³ aproximadamente.

Os procedimentos da construção dos provetes encontram-se detalhados na tabela 9.

Tabela 9 – Procedimentos da preparação dos provetes.

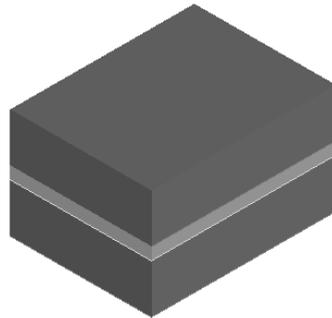
Etapa	Descrição	
1		<p>Construção de molde em poliestireno extrudido com as dimensões de 230x300x160 mm.</p>
2		<p>Aplicação de camada de ARMO-crete com cerca de 80 mm de espessura, devidamente vibrado, compactado e regularizado.</p>

3



Aplicação sobre a camada de ARMO-crete de pedra de granito com diferentes acabamentos de superfície (serrada, jacto de areia e bujardada), com recurso a vibração na aplicação da pedra para uma melhor aderência entre a argamassa e pedra. (Zona de superfície sujeita a tratamento voltada para cima).

4

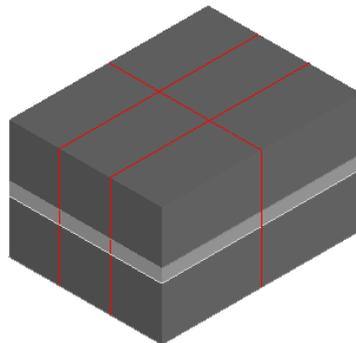


Aplicação de uma nova camada de argamassa com cerca de 80mm de espessura com vibração e regularização da superfície.

5

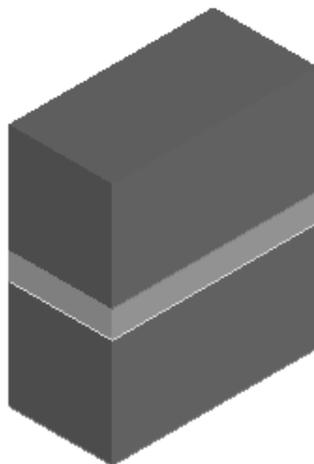
Remoção da cofragem dos vários blocos após uma semana de cura.

6



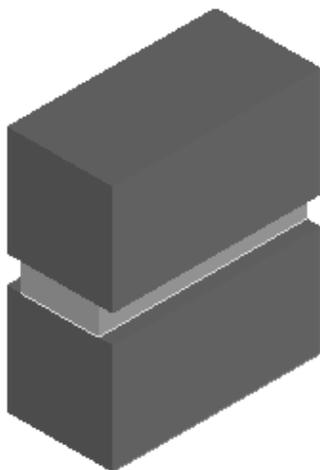
Corte dos provetes com forma prismática em que a partir de cada bloco se obtiveram 6 provetes.

7



Abertura de embricamento em cada provete.

8



Medição das dimensões dos provetes.

Nas figuras 36 – 41 mostram-se várias fotografias obtidas ao longo da preparação dos provetes.



Figura 36 - Molde de polistereno extrudido.



Figura 37 - Pedra de granito.



Figura 38 - Abertura de juntas na pedra de granito para melhor aderência.



Figura 39 - Preparação do ARMO-crete.



Figura 40 - Blocos finalizados.



Figura 41 - Provete finalizado.

4.3 Procedimento experimental adotado na realização dos ensaios de corte

Para a avaliação da resposta e resistência ao corte dos provetes anteriormente construídos, foram realizados ensaios com vista à obtenção dos parâmetros de resistência para diferentes níveis da tensão de confinamento. Com este propósito, o ensaio consistiu na imposição de um deslocamento crescente a uma velocidade constante na direcção horizontal ao nível da interface, e simultaneamente na aplicação de uma força vertical constante ao longo do tempo de ensaio, perpendicular à interface.

Segundo a figura 42, é possível distinguir duas partes no provete a ensaiar: a parte “A” que é constituída por argamassa de reforço e pedra de granito, e a parte “B” que é constituída apenas por argamassa de reforço (ARMO-crete). O atuador vertical aplica uma força vertical constante sobre a rótula e ainda sobre uma base de aço rígida que distribui a carga pelo topo do provete. A força vertical é determinada subtraindo o peso das bases de aço presentes no topo do provete, de forma a permitir a determinação da tensão vertical aplicada no provete. No que diz respeito ao atuador horizontal, o deslocamento imposto é aplicado na parte “B” do provete, o mais próximo possível do plano de interface. A geometria do ensaio e as condições fronteira, incluindo sistema de apoios, foi garantida recorrendo à fixação de 3 placas de reacção que faziam a ligação entre o pórtico e o provete. Estas placas foram devidamente aparafusadas de modo a evitar folgas que pudessem comprometer a rigidez do sistema.

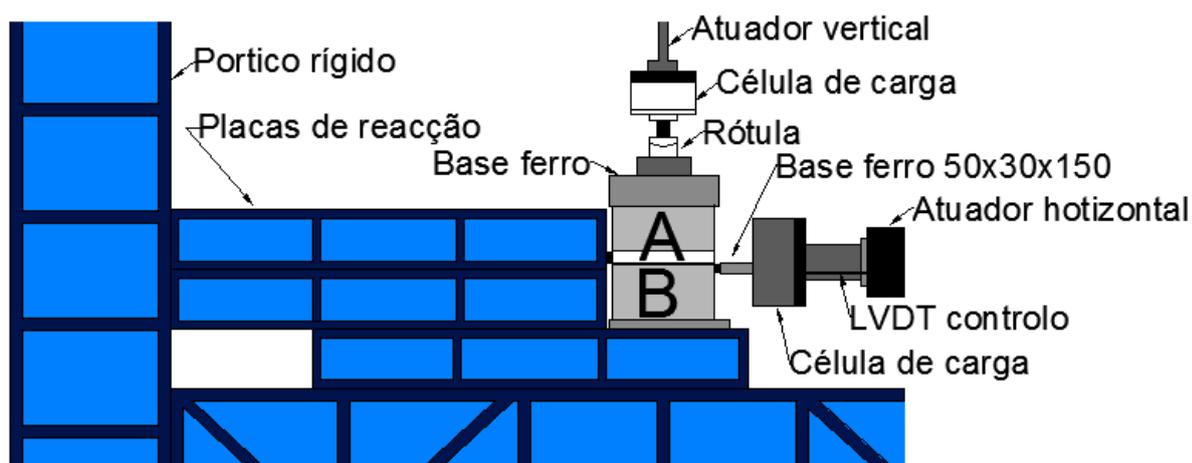


Figura 42 - Esquema de ensaio de corte.

Relativamente ao procedimento de ensaio, como já foi referido, por intermédio do atuador vertical aplica-se uma tensão de confinamento constante ao longo de todo o ensaio. O

deslocamento imposto pelo atuador horizontal, a uma velocidade constante, é controlado por um LVDT. Deste modo garante-se que deslocamento é imposto a uma velocidade de 0.004 mm/s durante os primeiros 7 mm e de 0.008 mm/s até aos 10 mm. Este deslocamento é aplicado sobre um pequeno prisma metálico situado numa das faces verticais da parte “B” do provete, e na face oposta existe também um pequeno prisma metálico entre a face do prisma e os elementos de reacção, para que seja possível minimizar a geração de momento fletor.

De forma a garantir a rigidez do sistema de aplicação de carga e de reacção, efetuaram-se ensaios preliminares à rigidez do sistema aplicando um deslocamento horizontal diretamente sobre o sistema de reacção (ver figura 43), verificando assim se este era suficientemente rígido para um bom controlo do ensaio. Ainda para esta verificação foi necessária a colocação de 2 LVDT's em lados opostos do sistema de reacção, de forma a verificar o deslocamento do mesmo e avaliar a sua razoabilidade.



Figura 43 - Avaliação da rigidez do sistema de aplicação de carga e reacção.

Para a realização dos ensaios de corte dos vários provetes, de forma a minimizar o efeito do atrito entre as superfícies de contacto entre as bases de ferro e o pórtico, utilizaram-se duas camadas interpostas de placas de alumínio e folhas de Teflon. A utilização deste material deveu-se ao seu baixo coeficiente de atrito. Estas placas de Teflon e alumínio foram colocadas no topo e base de provete, com uma espessura de 2.5 mm em cada uma das faces.

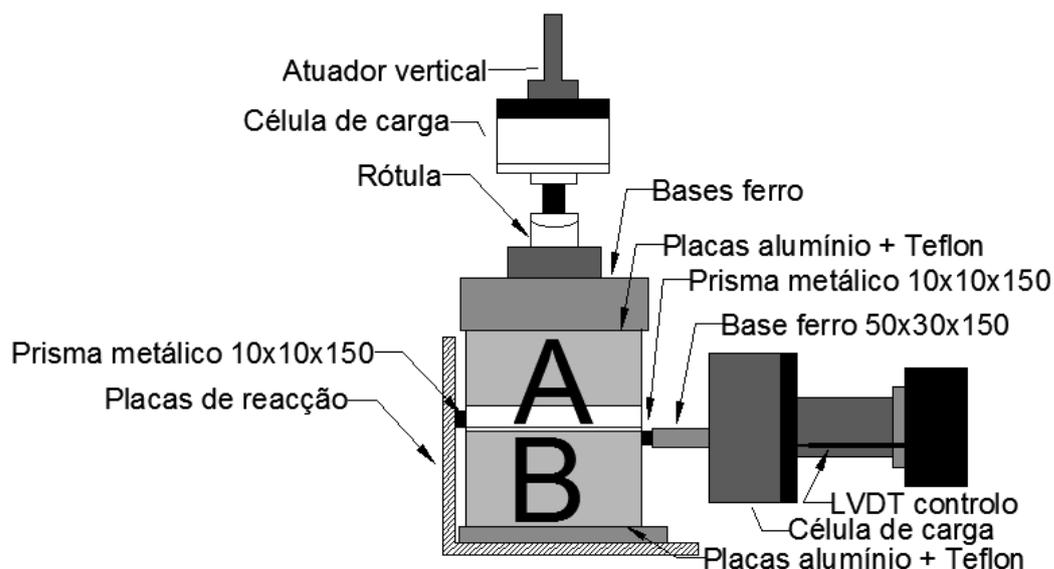


Figura 44 - Pormenor do esquema de ensaio.

De modo a registar o deslocamento vertical e o deslizamento entre as duas partes do provete, foram colocados quatro LVDT's em lados opostos do provete. Como demonstra a figura 45, é possível observar o posicionamento dos 2 LVDT's verticais em extremidades opostas, assim como 2 LVDT's horizontais. Importa ainda salientar que o LVDT de controlo foi colocado junto ao atuador. Através do sistema de desmultiplicação da medição do deslocamento do atuador foi possível reduzir a velocidade do ensaio em cerca de 7 vezes, obtendo-se assim melhores resultados relativamente ao controlo do ensaio.

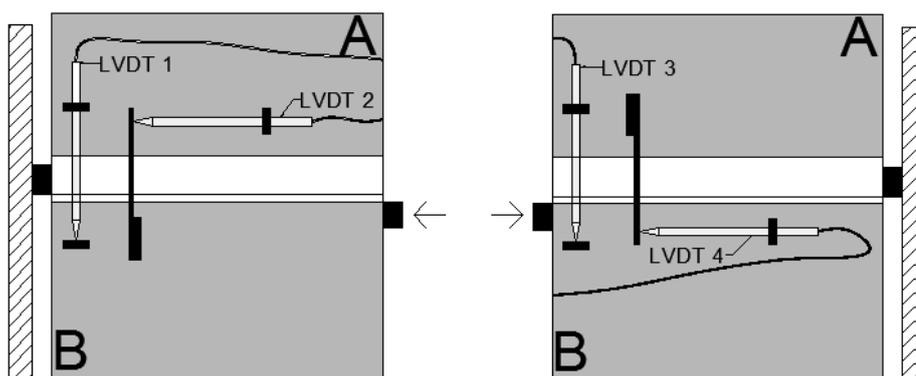


Figura 45 - Posições dos LVDT's.

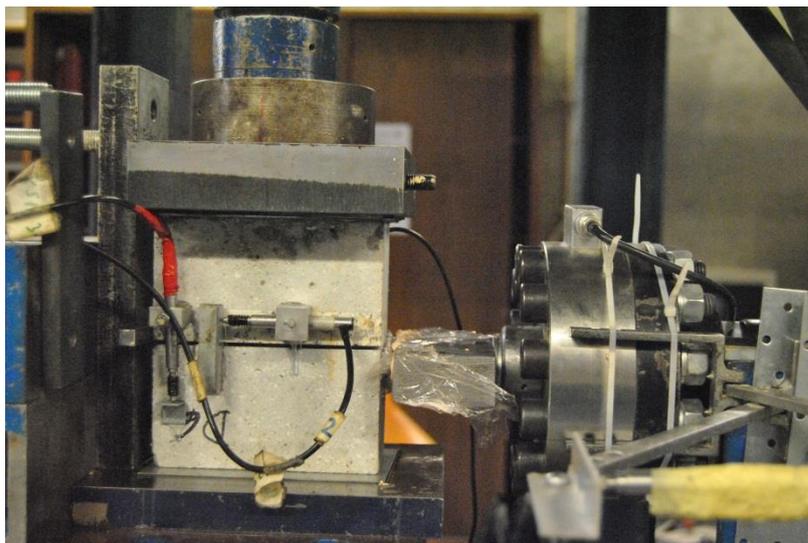


Figura 46 - Detalhe do provete em posição de ensaio.



Figura 47 - Perspetiva geral do esquema de ensaio, incluindo o sistema de reacção, atuador e sistema de desmultiplicação do deslocamento.

4.4 Resultados

Previamente à realização dos ensaios dos provetes de granito foi necessário, como já foi referido no ponto anterior, determinar a rigidez do sistema. Para este fim, procedeu-se a um ensaio com aplicação de um deslocamento horizontal diretamente no sistema de reacção, tendo-se atingido um valor máximo da força aplicada de 30.02 kN. Assim, e tendo em conta esta força máxima, obteve-se um deslocamento máximo entre o ponto de aplicação da força e

o apoio de reação de 55 μ m. Tendo em conta os valores obtidos, e considerando que nos ensaios realizados o valor da carga máxima a atingir estimado é significativamente inferior concluiu-se que o sistema proposto para a realização dos ensaios proporciona rigidez suficiente.

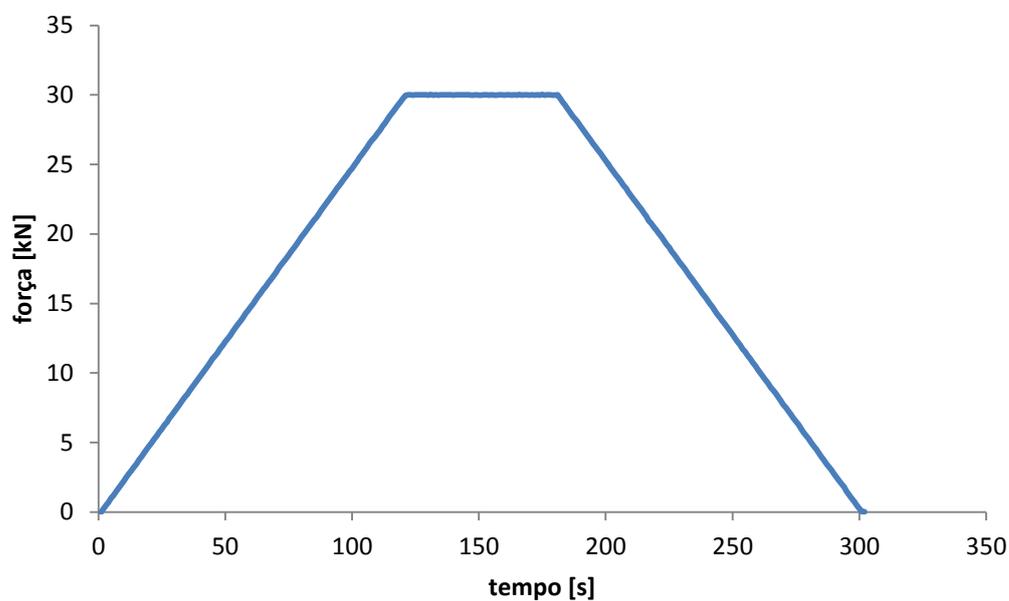


Figura 48 - Força [kN] vs tempo [s].

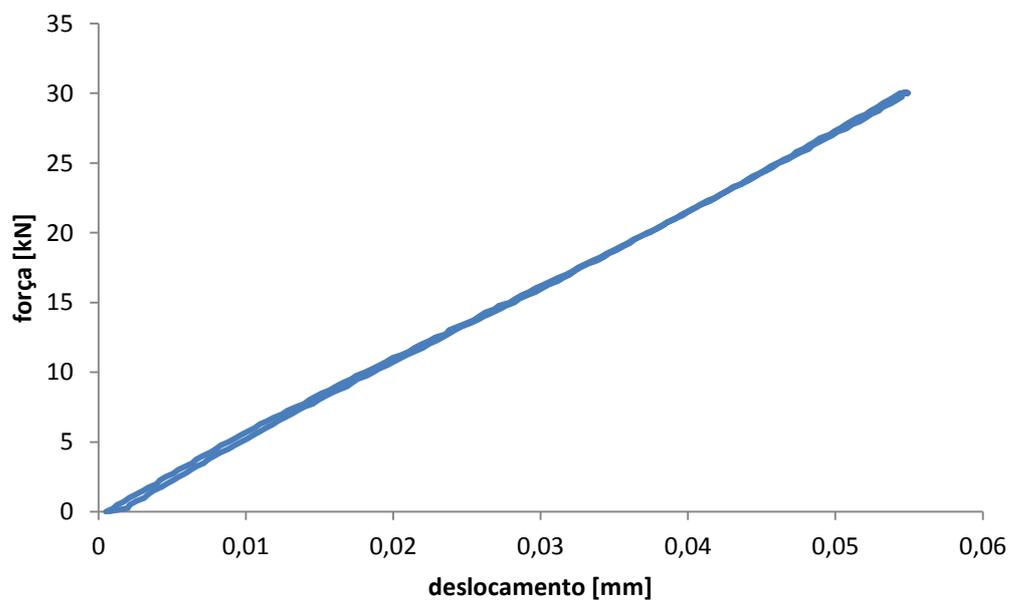


Figura 49 - Força [kN] vs deslocamento [mm].

O número de provetes testados para cada tipo de acabamento da superfície de granito (serrado, jato de areia, bujardado), foi definido consoante a necessidade de identificar adequadamente o critério de cedência e de forma a conduzir a um resultado experimental o mais representativo possível.

A geometria geral do critério de rotura dominante foi avaliada por intermédio da determinação de um conjunto de pontos definidos pelo binómio tensão normal, σ , versus tensão de corte, τ , considerando tanto a fase em que se atinge a carga de pico como a fase pós-pico. Deste modo, foi necessário proceder ao calculo de diversos parâmetros entre os quais a tensão normal, σ , tensão tangencial de pico, τ_p , e ainda a tensão tangencial residual, τ_r . Assim, estes parâmetros foram calculados através das seguintes equações (4.1) (4.2) (4.3):

- Tensão normal:

$$\sigma = \frac{N}{A_{eff}} \quad (4.1)$$

- Tensão tangencial de pico:

$$\tau_p = \frac{T_p}{A_{eff}} \quad (4.2)$$

- Tensão tangencial residual:

$$\tau_r = \frac{T_r}{A_{eff}} \quad (4.3)$$

Em que:

- N: força vertical;
- A_{eff} : Área efectiva ao nível da interface;
- T_p e T_r : força de pico e residual respectivamente, medida pela célula de carga.

No que diz respeito à tensão tangencial residual, esta foi determinada considerando a média dos valores de força obtidos durante o ultimo milímetro de deformação de deslizamento registada durante o ensaio, sendo este procedimento aplicado às diferentes superfícies e a todos os provetes ensaiados.

Em geral, a resposta expectável em termos de deslocamento transversal, ou deslizamento, versus a tensão tangencial, encontra-se representada na figura 50.

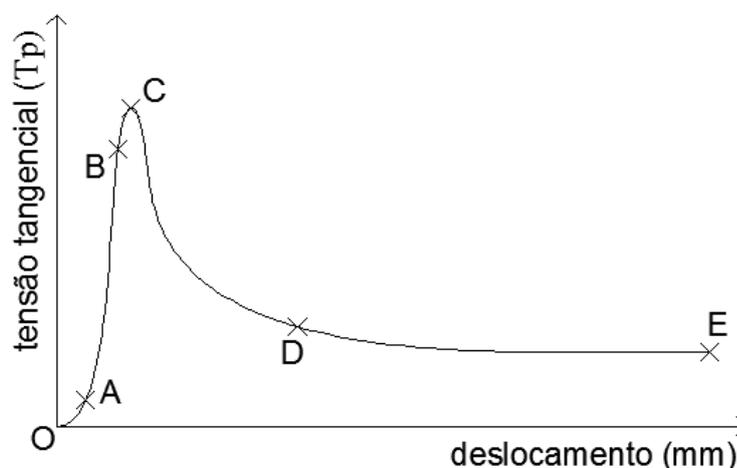


Figura 50 - Comportamento obtido no ensaio de corte

Analisando esta curva é possível distinguir vários pontos críticos e regiões entre as quais se distinguem:

OA – zona ligeiramente convexa, que reflete a ligeira adaptação do provete ao sistema de aplicação da carga e aos apoios;

AB – próximo de comportamento linear, corresponde à zona de comportamento elástico em que o provete é sujeito a compressão e corte;

BC – corresponde à zona de iniciação e propagação local de micro-fendas na região da interface;

C – transição entre a zona elástica e a plástica com comportamento irreversível, correspondente ao instante em que se atinge a força de pico;

CD – região pós-pico da resposta, que é determinada pela localização da micro-fendilhação em uma macro-fenda de corte;

DE – corresponde à zona de tensão residual, que tende a adotar uma pendente horizontal em consequência da fricção entre as superfícies opostas da interface; a pendente não é totalmente

horizontal devido à existência de mecanismos de deterioração do imbricamento entre as superfícies opostas, que se traduz numa diminuição gradual do coeficiente de atrito.

Considerando o gráfico acima (figura 50), é possível distinguir dois pontos importantes para a obtenção das tensões tangenciais de pico e residual. A tensão tangencial de pico é obtida através do ponto C, enquanto a tensão tangencial residual é obtida através do cálculo da média dos pontos que correspondem à zona “DE”.

Os resultados obtidos apresentam-se nas figuras 51 - 53 e tabelas 10 -12 a seguir, onde os provetes são distinguidos por uma letra e número dependendo exclusivamente do bloco e dia em que a mistura da argamassa de ARMO-crete foi feita.

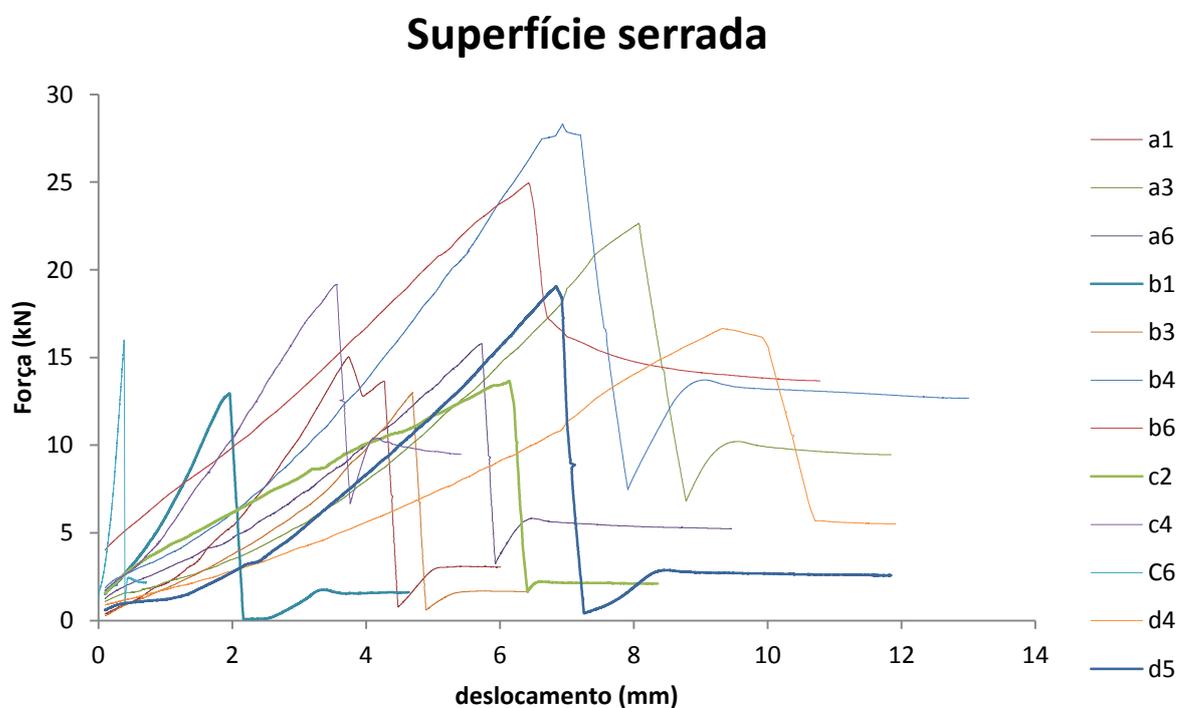


Figura 51 - Respostas obtidas nos ensaios dos provetes com superfície serrada.

Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios dos provetes com superfície serrada.

Provete	A_{eff} [mm ²]	σ [MPa]	τ_p [MPa]	τ_r [MPa]
A1	5328.16	0.5	2.903	0.57491
A3	5210.15	2.04	4.618	1.82665
A6	5343.90	0.982	2.988	0.98666
B1	5433.34	0.223	2.439	0.29065
B3	5419.32	0.23	2.484	0.30746
B4	5046.39	2.979	5.846	2.52197
B6	5555.66	2.988	4.532	2.47366
C2	5107.91	0.297	2.68	0.41533
C4	5507.32	1.981	3.543	1.76222
C6	5066.34	0.343	3.156	0.43068
D4	5348.10	0.985	3.224	1.03907
D5	5454.57	0.447	3.568	0.47653

Superfície Jato de areia

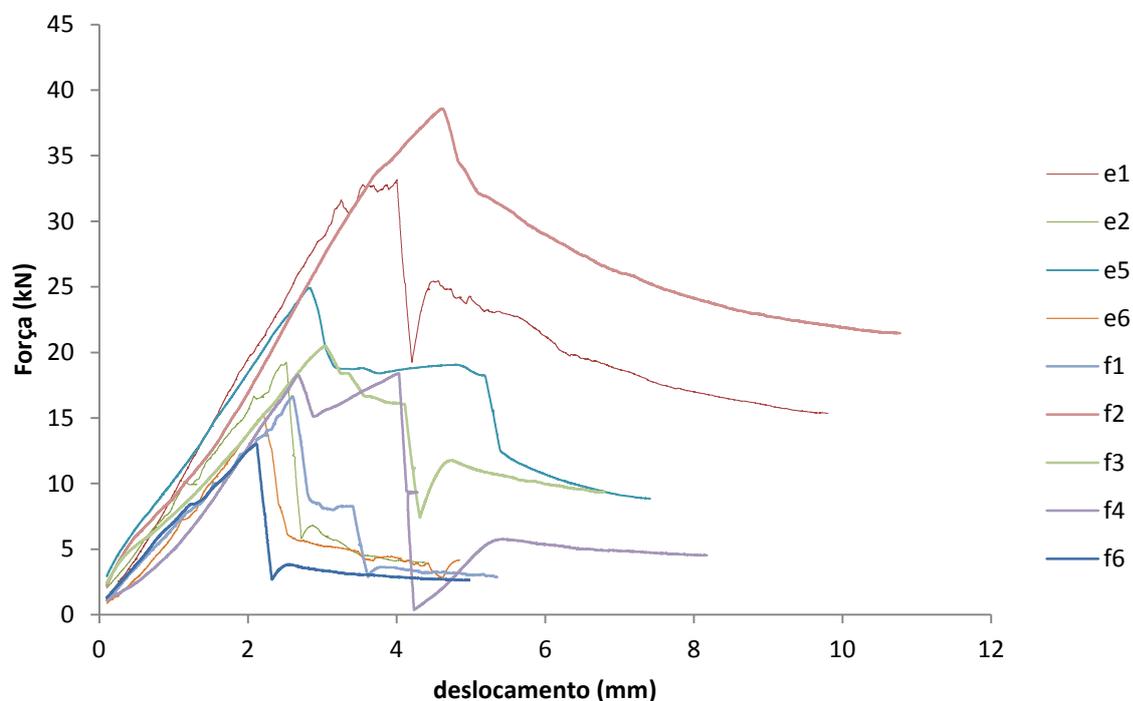


Figura 52 - Respostas obtidas no ensaio de superfície jato de areia.

Tabela 11 - Resultados obtidos nos ensaios de superfície jato de areia.

Provete	A_{eff} [mm ²]	σ [MPa]	τ_p [MPa]	τ_r [MPa]
E1	5675.12	1.89	6.07	2.76241
E2	5713.12	0.299	3.581	0.74847
E5	5534.7	0.965	4.596	1.69266
E6	5410.6	0.518	3.018	0.76908
F1	5754.32	0.293	3.042	0.5409
F2	5514.85	3.043	7.063	3.939
F3	5781.19	0.96	3.6	1.6827
F4	5592.03	0.492	3.382	0.8318
F6	5831.28	0.227	2.291	0.4694

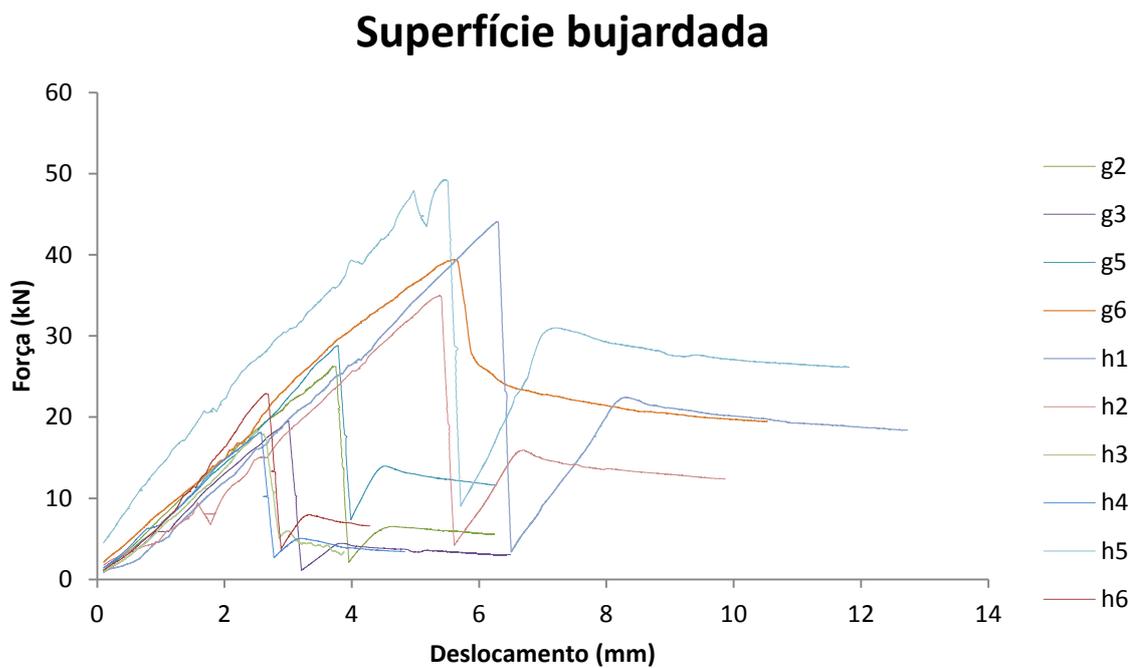


Figura 53 - Respostas obtidas no ensaio de superfície bujardada.

Tabela 12 - Resultados obtidos nos ensaios de superfície bujardada.

Provete	A_{eff} [mm ²]	σ [MPa]	τ_p [MPa]	τ_r [MPa]
G2	7166.93	0.464	3.822	0.81481
G3	6854.71	0.313	2.916	0.46583
G5	7011.32	0.981	4.210	1.7215
G6	6934.31	1.934	5.742	2.84036
H1	6753.42	1.948	6.606	2.75845
H2	6972.01	1.050	5.062	1.81798
H3	7087.48	0.215	2.801	0.6228
H4	7084.69	0.230	2.614	0.51546
H5	7029.59	2.996	7.093	3.74914
H6	7068.08	0.520	3.326	1.02

4.5 Discussão de resultados

Através dos resultados obtidos dos vários ensaios para os três tipos de superfície, averiguou-se qual o critério de cedência mais adequado para descrever o comportamento mecânico da interface entre a superfície de granito e a argamassa de reforço, o ARMO-crete.

De entre os diferentes modelos e critérios que permitem avaliar a cedência de materiais existentes descritos no capítulo 2.5, considerando a natureza frágil dos materiais testados e o mecanismo de rotura predominante, optou-se por averiguar a adequabilidade do critério de Mohr para descrever os resultados obtidos. Como já demonstrado no capítulo 2.5.4, este critério depende fundamentalmente de três parâmetros e é descrito pela seguinte equação (4.4):

$$\sigma_T = \sqrt{(c - \sigma \times \tan \varphi)^2 - (c - \chi \times \tan \varphi)^2} \quad (4.4)$$

Onde,

c – coesão [MPa];

φ – ângulo de atrito [°];

σ – tensão normal [MPa];

χ – resistência à tracção [MPa].

Em termos geométricos o critério de Mohr pode ser representado graficamente no plano por (considerando as tensões normais de compressão como negativas):

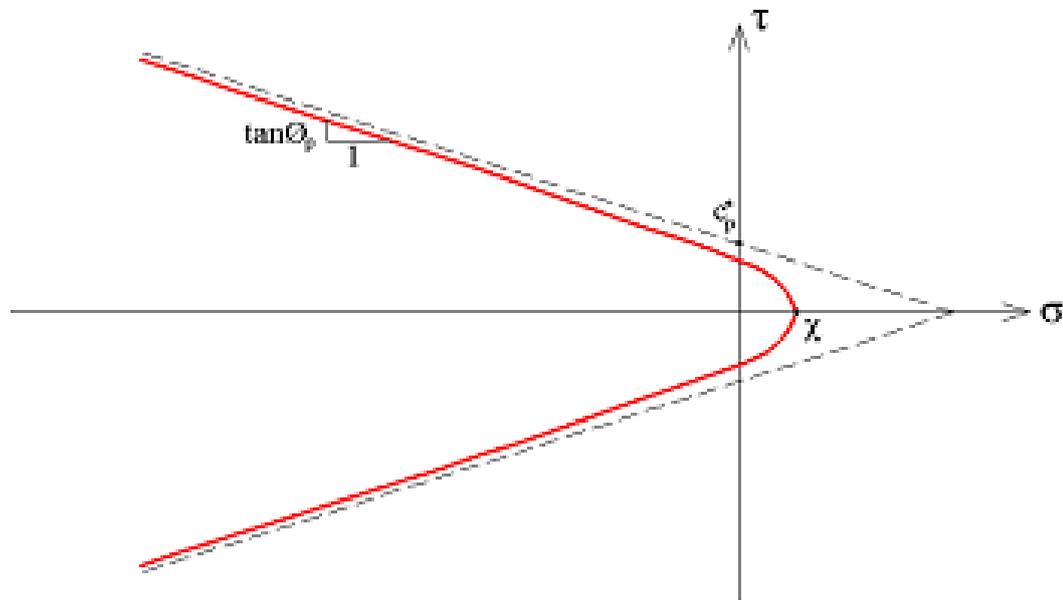


Figura 54 - Representação gráfica do critério de cedência de Mohr no plano.

De forma a averiguar o grau de correlação entre o critério de cedência de Mohr e os resultados experimentais obtidos nos ensaios de corte, foi usada a ferramenta numérica “curve fitting tool” do Matlab. Os resultados que a seguir se apresentam resultam da adoção do algoritmo “Trust-Region”, disponível nesta ferramenta. Através deste conseguimos obter a melhor aproximação aos parâmetros da equação de Mohr que resultou num coeficiente de correlação ótimo. Deste modo, considerando os valores da força tangencial de pico no cálculo da tensão de corte, foi possível obter as seguintes aproximações aos resultados experimentais (figura 55 a 57):

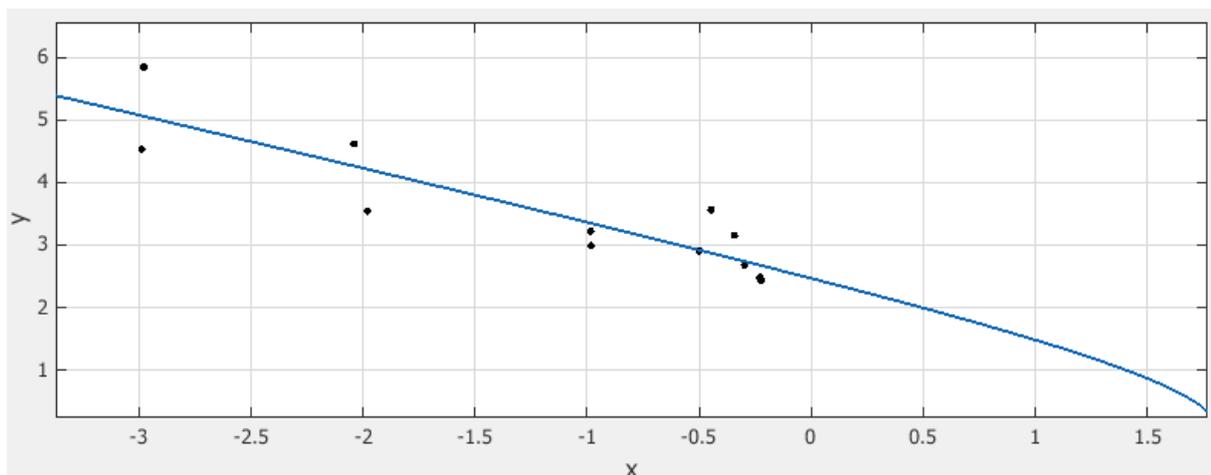


Figura 55 - Critério de rotura superfície serrada para tensões de pico (x- tensões normais; y- tensão tangencial de pico [MPa]).

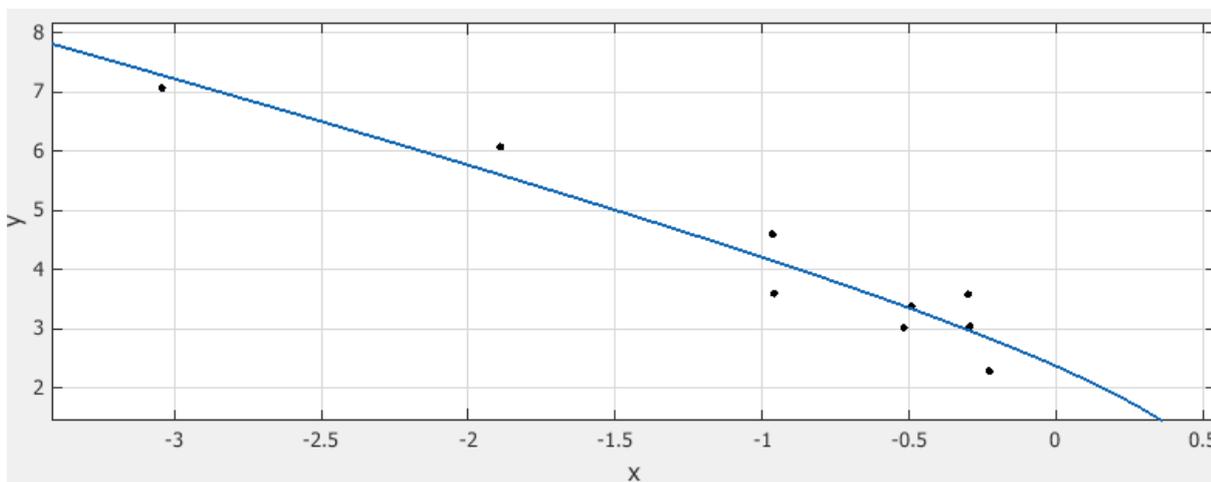


Figura 56 - Critério de rotura superfície jato de areia para tensões de pico (x- tensões normais; y- tensão tangencial de pico [MPa]).

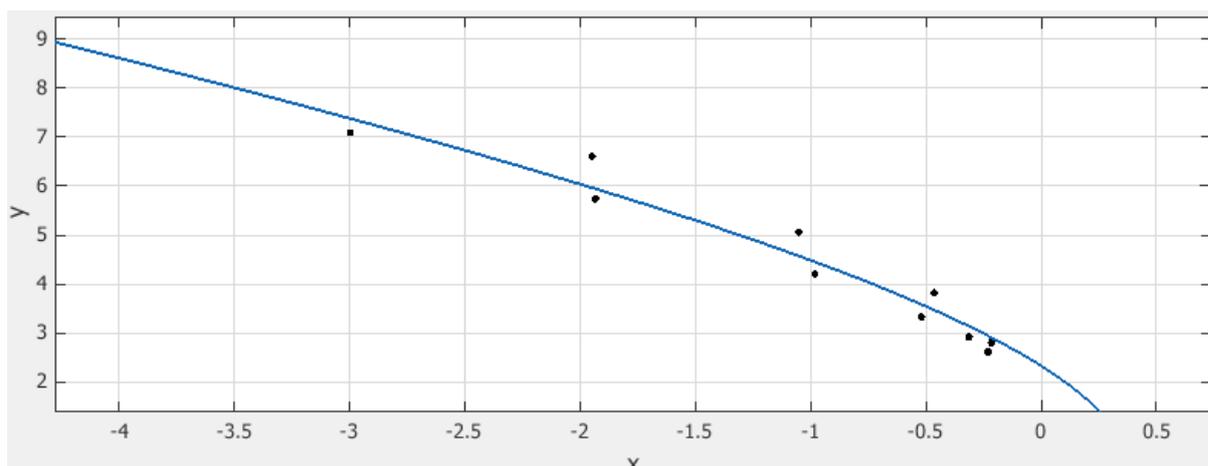


Figura 57 - Critério de rotura superfície bujardada para tensões de pico (x- tensões normais; y- tensão tangencial de pico [MPa]).

Através das curvas obtidas com o algoritmo “Trust-Region”, foi possível identificar os parâmetros relativos à equação do critério de Mohr, tendo-se obtido os seguintes resultados presentes na tabela 13:

Tabela 13 - Parâmetros do critério de Mohr estimados através do algoritmo "Trust-Region".

Superfície	c [MPa]	Φ [°]	χ [MPa]	R^2 [-]
Serrada	2.324	34.454	1.82	0.7957
Jato de areia	2.02	42.50	0.6	0.9195
Bujardada	2.1	36.51	0.4	0.9501

Concluído o processo de aproximação das curvas de Mohr aos resultados obtidos experimentalmente, numa primeira análise, constata-se que os valores de correlação obtidos são elevados, e no caso das superfícies jato de areia e bujardada são mesmo bastante satisfatórios. No entanto, relativamente à superfície serrada este valor não é tão elevado, o que poderá indicar alguma inadequação do critério de Mohr a este tipo de superfície. De qualquer modo o grau de correlação poderá ser inferior sobretudo devido à dispersão dos resultados obtidos, já que o facto de a superfície ser lisa origina um modo de rotura bastante mais frágil e consequentemente uma dispersão de resultados consideravelmente superior.

Ainda, analisando os valores obtidos na tabela 13, reparamos desde logo que os valores de resistência à tracção, χ , obtidos diferem dos valores obtidos no capítulo 3.4. Em primeiro lugar importa referir que, no caso de se optar por impor os valores de χ obtidos no capítulo 3.4

correspondentes aos valores da tensão de aderência obtidos por intermédio do ensaio de pull-off, a aproximação da curva aos resultados experimentais resulta num grau de correlação, R^2 , inferior. Assim, foram deixadas as três variáveis, coesão, ângulo de atrito e resistência à tração em aberto, sendo o algoritmo a otimizar a aproximação da curva.

Ainda no que se refere ao valor da resistência à tração, ou aderência, provavelmente poder-se-á concluir que o ensaio de pull-off não reproduz as condições ideais para a obtenção deste valor por não ser um ensaio de tração pura, provavelmente porque, aquando do arrancamento, a peça pode sofrer rotação que resulta em tensões de compressão na secção, não se obtendo então um valor exclusivamente de tração.



Figura 58 - Comparação entre as três superfícies estudadas.

Observando a figura 58, através da comparação das superfícies de rotura para os vários tipos de provete podemos constatar que, no caso da superfície serrada, se obteve uma rotura que é acompanhada sobretudo do deslizamento da interface entre os dois materiais, enquanto, em oposição, no caso da superfície bujardada se observa um desgaste dos materiais de ambas as faces. No que diz respeito à superfície com tratamento de jato de areia, aparentemente obteve-se um resultado intermédio entre os dois casos anteriores, com relativo desgaste ao nível da superfície de contacto. No entanto o seu comportamento aproxima-se mais do observado para a superfície bujardada.

É possível ainda distinguir ligeiras diferenças entre as três superfícies de rotura. Primeiro, no que diz respeito à superfície serrada, não se nota a presença de argamassa aderida à superfície do granito, nem de granito na metade de argamassa, enquanto na superfície bujardada se nota a presença de fragmentos de granito na superfície de argamassa e também presença de argamassa na superfície do granito. A superfície tratada com o jato de areia, uma vez mais,

exibe um comportamento intermédio em relação a ambos os tipos de provete referidos anteriormente.

Concluída a caracterização do ensaio de corte relativamente á tensão tangencial de pico, realizou-se a mesma análise considerando os valores obtidos para a tensão tangencial residual, para os três tipos de substrato em análise no âmbito deste trabalho.

Para descrever a curva do critério de Mohr em termos dos valores obtidos para as tensões residuais, e considerando que neste contexto o valor do parâmetro relativo à resistência à tração se reduz a zero, a expressão é dada por (equação 4.5):

$$\tau_r = \sqrt{(c_r - \sigma * \tan(\varphi_r))^2 - (c_r)^2} \quad (4.5)$$

onde:

τ – tensão tangencial [MPa];

σ – tensão normal [MPa];

c_r – coesão residual [MPa];

φ – ângulo de atrito residual [°].

Assim, tal como anteriormente, foi usada a ferramenta numérica “curve fitting tool” do Matlab. Os resultados que a seguir se apresentam resultam da adoção do algoritmo “Trust-Region”, disponível nesta ferramenta. Através deste conseguimos obter a melhor aproximação aos parâmetros da equação de Mohr que resultou num coeficiente de correlação ótimo. Deste modo foi possível obter as seguintes aproximações aos ensaios experimentais (ver figura 59 a 61)

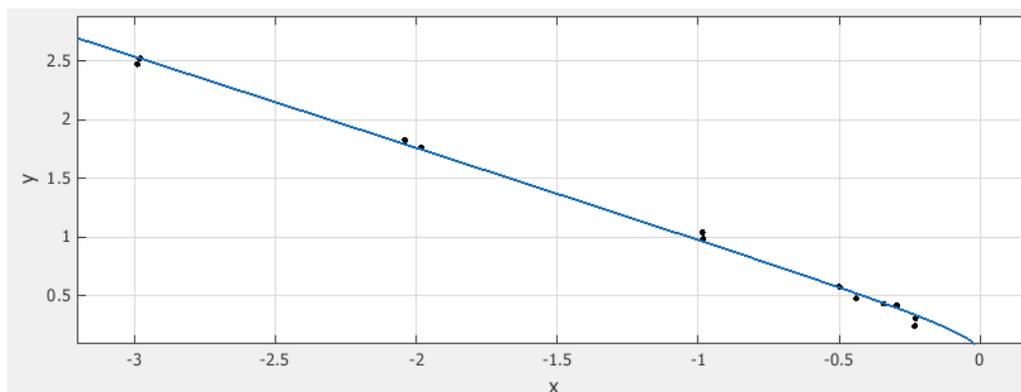


Figura 59 - Critério de rotura na superfície serrada para tensões residuais (x- tensões normais; y- tensão tangencial residual [MPa]).

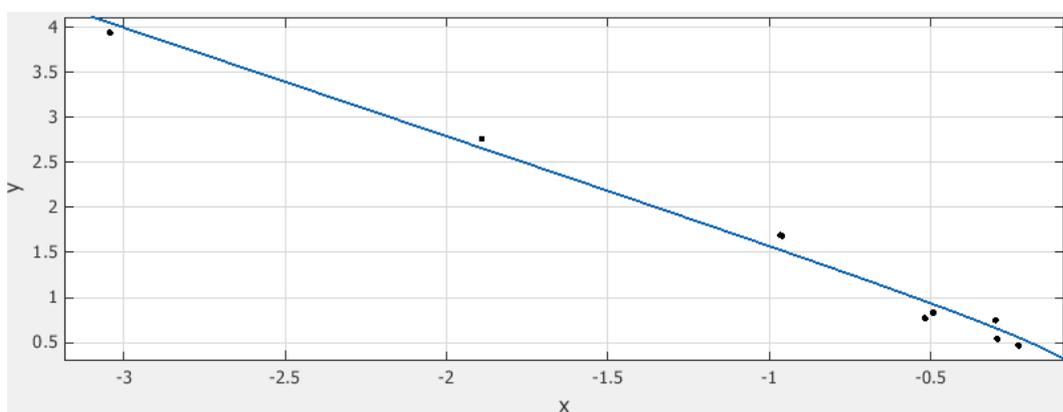


Figura 60 - Critério de rotura da superfície jato de areia para tensões residuais (x- tensões normais; y- tensão tangencial residual [MPa]).

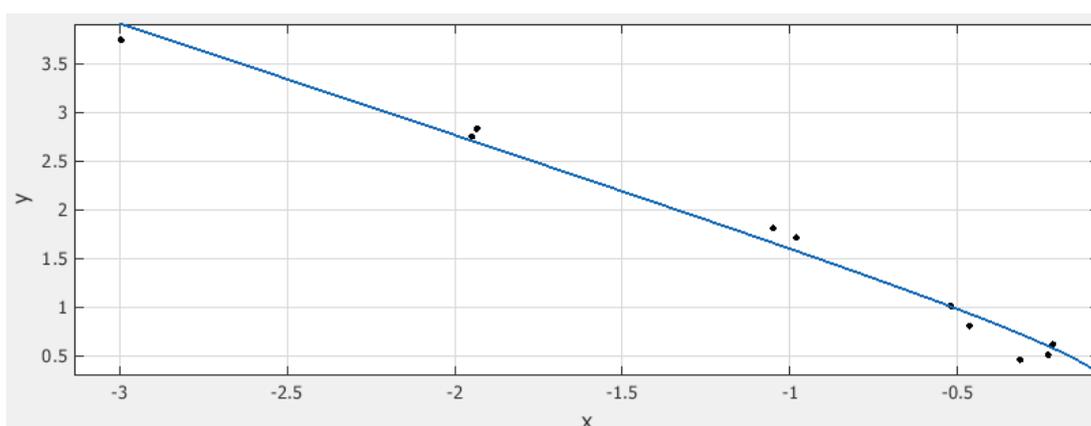


Figura 61 - Critério de rotura da superfície bujardada para tensões residuais (x- tensões normais; y- tensão tangencial residual [MPa]).

Através das curvas obtidas com o algoritmo “Trust-Region”, foi possível identificar os parâmetros relativos à equação do critério de Mohr para tensões residuais, tendo-se obtido os seguintes resultados presentes na tabela 14:

Tabela 14 - Parâmetros do critério de Mohr estimados pelo algoritmo “Trust-Region” para tensões residuais.

Superfície	c [MPa]	Φ [°]	R^2 [-]
Serrada	0.223	33.41	0.997
Jato de areia	0.4334	41.16	0.9866
Bujardada	0.4798	40.20	0.9843

Através dos resultados obtidos, podemos considerar que o critério de Mohr se ajusta perfeitamente aos valores de tensões residuais estudados. Assim, para a superfície serrada obtivemos um valor de correlação do ajuste da curva de Mohr de 0.997, para a superfície jato de areia de 0.9866 e, por último, para a superfície bujardada o ajuste da curva de Mohr aos valores de tensões residuais obtidos foi de 0.9843.

Em suma, e considerando os resultados obtidos das aproximações da curva de Mohr aos valores de tensões de pico e residuais, considera-se que este critério pode caracterizar a interface entre o substrato de granito e o material de reforço estrutural de matriz cimentícia (ARMO-crete), uma vez que as correlações obtidas correspondem, na generalidade, a valores próximos de 1.

5 Análise da rugosidade da superfície de granito

Este capítulo dedica-se exclusivamente à análise da rugosidade das superfícies dos blocos de granito referidos anteriormente. Primeiramente interessa introduzir quais as metodologias existentes atualmente que possam utilizadas neste tipo de análise. Importa também abordar os principais parâmetros que devem ser considerados quando se analisa a rugosidade de uma superfície. Em seguida, descrevem-se e discutem-se os ensaios usados para a caracterização da rugosidade das superfícies de granito utilizadas neste estudo, assim como os resultados obtidos em cada um deles. Por último, referem-se sumariamente as principais conclusões obtidas.

5.1 Metodologias existentes para a caracterização da rugosidade

Considerando que a interface entre o material de reforço e a superfície de alvenaria a reforçar deverá consistir no elo mais fraco do sistema, será importante analisar a superfície de alvenaria em que se pretende aplicar o reforço de modo a caracterizar a forma, a variabilidade e a profundidade das rugosidades superficiais, uma vez que estas características certamente influenciam o comportamento mecânico da interface entre as duas superfícies.

Assim, para efetuar a análise destes parâmetros será necessário recorrer a técnicas de caracterização da rugosidade. A análise da rugosidade de superfícies de alvenaria poderá ser determinante na definição da solução de reforço a adotar.

Em geral, poderão dividir-se os procedimentos de análise da rugosidade de superfície em dois tipos distintos: os que implicam o contacto com a superfície e os que não requerem contacto. Assim, é importante primeiramente distinguir estes dois tipos de técnicas. A utilização de técnicas em que existe contacto entre o equipamento a ser usado e a superfície onde se realiza a medição é provavelmente mais frequente, pois existe uma maior facilidade no processamento dos dados e o equipamento tem um custo mais baixo. No entanto, estes sistemas possuem uma grande desvantagem quando comparados com os sistemas de não contacto, pois com estes sistemas de contacto a superfície pode ficar danificada, a velocidade de execução é menor e ainda é bastante complicado obter dois resultados iguais (20) (21).

Com a evolução da tecnologia e o desenvolvimento de ferramentas tridimensionais sem contacto, os equipamentos tornaram-se mais eficazes e práticos. Assim, a criação de modelos 3D tornou-se mais acessível, permitindo obter a topografia de superfícies com maior

resolução e torna-se também possível realizar repetidamente ensaios, sendo que os resultados tendem a ser mais parecidos comparativamente com os ensaios de contacto. Importa ainda referir que a utilização deste tipo de equipamentos não causa desgaste nas superfícies a documentar, consistindo uma das grandes vantagens destes sistemas. Por outro lado, contrariamente aos equipamentos em que há contacto com a superfície, os equipamentos de caracterização tridimensional sem contacto tendem a ter um custo mais elevado (20) (21).

Tendo em conta todos estes factores, apresenta-se em seguida um esquema dos diversos tipos de sistemas de medição disponíveis atualmente (21).

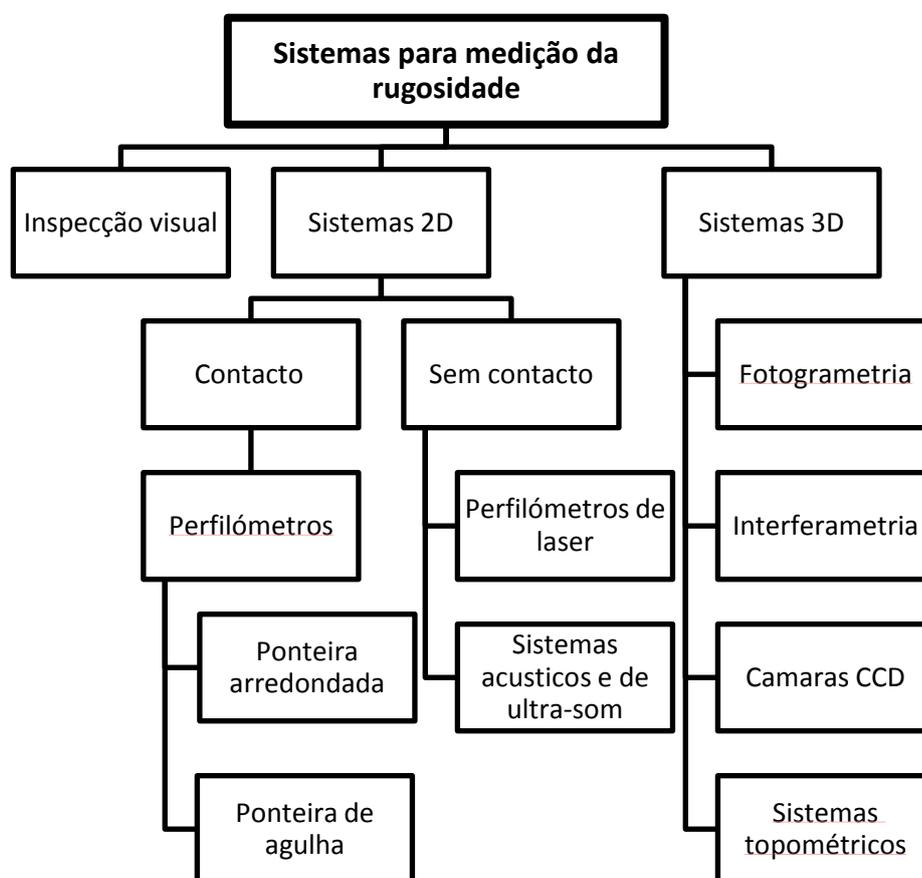


Figura 62 - Esquema de sistemas de medição da rugosidade (Adaptado de Grasselli, 2001).

5.1.1 Inspeção Visual

É um método que se baseia na opinião de um técnico especializado e sem o recurso a instrumentação auxiliar. Devido a este facto, é um método que é muito variável e subjectivo, sujeito ao erro humano.

5.1.2 “Sand patch test”

É uma técnica simples que consiste na aplicação de um determinado volume de areia conhecido sobre uma área seca, e na subseqüentemente medição da área coberta (figura 63). Este método tem a vantagem de ser barato e prático, pois tanto pode ser usado em laboratório como in-situ. No entanto tem uma grande contrariedade pois só pode ser usado em superfícies planas horizontais (22).

Após o espalhamento do volume de areia é possível calcular a rugosidade da superfície através da seguinte expressão (5.1) (22):

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (5.1)$$

em que:

V – volume de areia usado no ensaio (mm³);

D – diâmetro de área coberta pela areia (mm);



Fig. 7. Sand Patch apparatus (Model Controls).

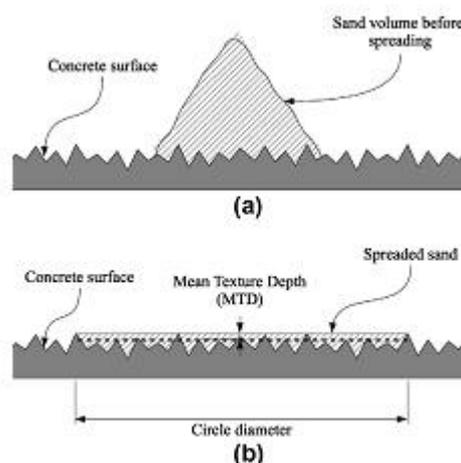


Figura 63 - Sand patch test (a) antes do espalhamento da areia (b) depois do espalhamento da areia.

5.1.3 “Outflow meter”

É um método volumétrico, muito utilizado na medição da rugosidade de superfícies de asfalto (figura 64). Consiste num cilindro entre dois anéis de borracha que percorre a superfície. A medição da rugosidade é feita através de um volume de água que está dentro do cilindro, que vai sendo distribuído pela superfície. Aqui é calculado o tempo necessário para a água encher por completo a superfície.

Para a utilização desta técnica é necessário previamente molhar a superfície durante aproximadamente 1 minuto. Este método tem diversas desvantagens, em particular só se pode utilizar em superfícies horizontais planas e a permeabilidade da superfície tem grande influência na qualidade dos resultados (22).

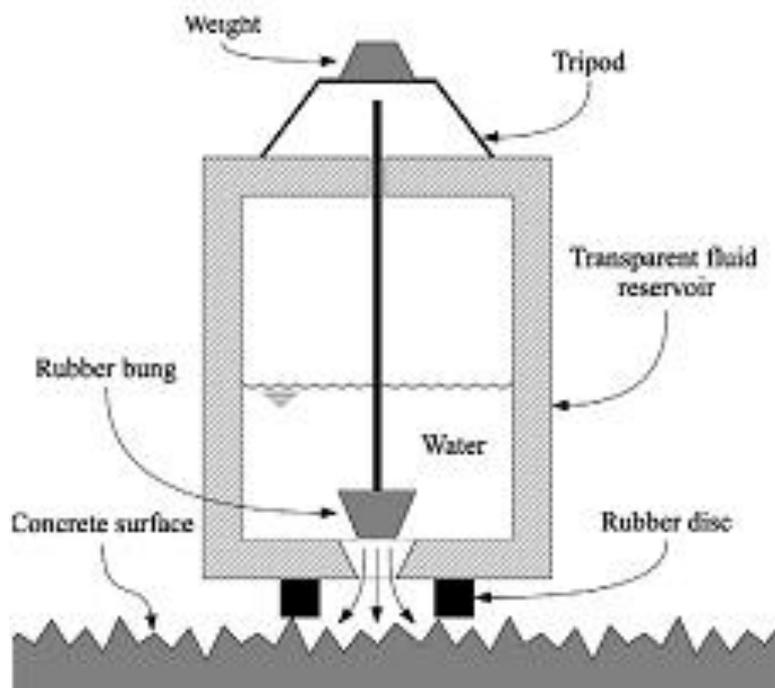


Figura 64 - Método Outflow Meter.

5.1.4 “Circular texture meter”

É uma técnica em que não existe contacto entre a superfície e o sistema de medição. Consiste numa dupla de lasers medidores de deslocamento, montados num braço rotativo circular com diâmetro aproximado de 284 mm. Estes estão ligados a um computador que faz o processamento dos dados. Com a utilização deste método estamos a reduzir o erro humano quando comparado com os métodos anteriores, é também uma técnica de fácil e rápida execução, no entanto tem uma grande contrariedade, pois é um método caro (22).

5.1.5 “Digital surface roughness meter”

Este sistema é composto por uma caixa portátil de alumínio em que no seu interior existe uma câmara fotográfica e um laser (figura 65). O processamento dos dados é feito num computador em que é obtido um mapa de cores automaticamente calculado, que representam a altura a que se encontram os diversos pontos.

O digital surface roughness meter é um sistema que pode ser aplicado in situ e tem como principais vantagens a possibilidade de se repetir os ensaios diversas vezes, obtendo assim melhores resultados e diminuindo-se a influência de erro humano. A sua principal desvantagem é o seu custo, sendo um equipamento bastante caro (22).

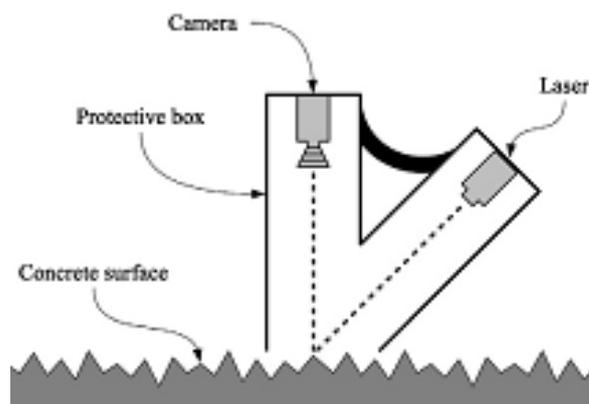


Figura 65 - Digital surface roughness meter.

5.1.6 “Slit-Island method”

Este método consiste em cobrir a superfície a caracterizar com uma camada fina de outro material, normalmente uma resina. Após aplicação, a resina é polida paralelamente à superfície em várias fases. Em cada fase são tiradas fotografias do topo e através do processamento dos dados é possível determinar a área e perímetro das ilhas.

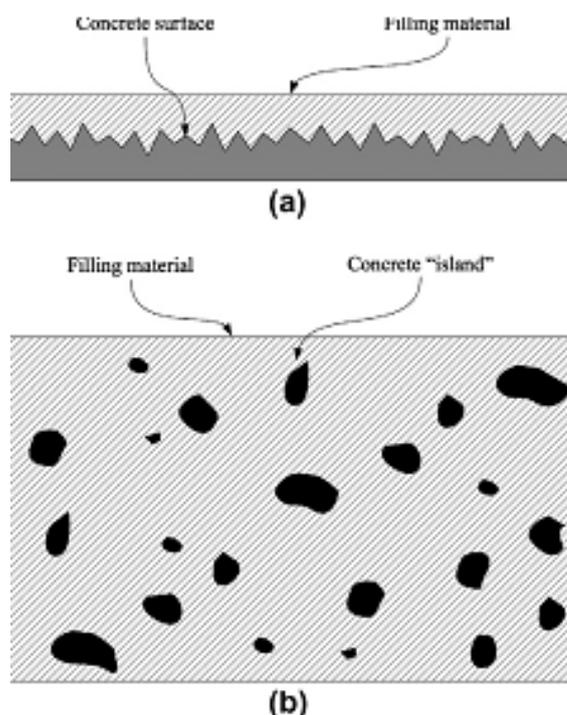


Figura 66 – “Silt-Island method” (a) preparação provete (b) vista do topo das ilhas.

5.1.7 “Mechanical Stylus”

É um mecanismo usado para medição da rugosidade em condições laboratoriais. Este sistema pode ser constituído por uma ou mais ponteiros que se movem exclusivamente numa direcção (figura 67). Uma vez ligado o dispositivo a um computador, este grava a posição vertical da ponteira, sendo que horizontalmente este mecanismo é controlado por um motor que pode oferecer vários tipos de velocidade de ensaio (21).

O ensaio aqui mencionado faz uma análise quantitativa, uma vez que é usada uma escala de valores para os parâmetros da rugosidade. Visto este ser um sistema de contacto pode originar pequenos danos na superfície a caracterizar (22).

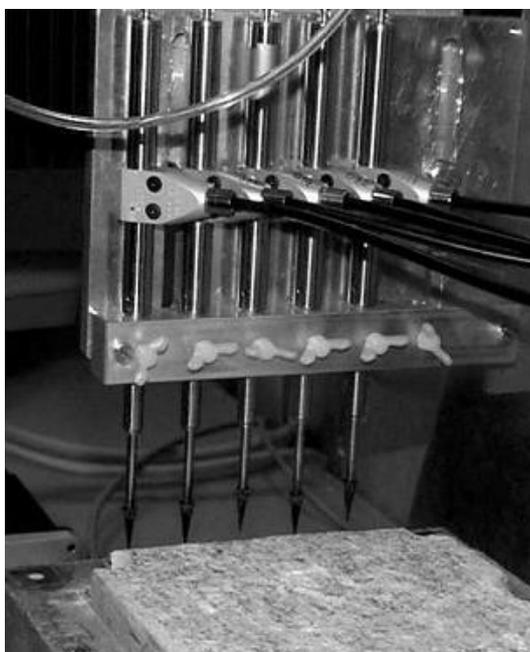


Figura 67 – Técnica “Mechanical stylus”.

5.1.8 “3D laser scanning”

Este é um sistema em que não existe contacto entre a superfície e o mecanismo, o que torna o ensaio não destrutivo, sendo esta uma das grandes vantagens associadas a este método. O “3D laser scanning” compreende duas camaras, um laser e um computador para efectuar o processamento dos dados (23).

Importa referir que é possível a utilização deste aparelho em zonas de difícil acesso. Para além disto é um sistema portátil, de elevada precisão, e que permite cobrir áreas consideráveis. A sua principal contrariedade é seu custo do equipamento (22) (23).



Figura 68 – Aparelho de “3D laser scanning”.

Para além dos ensaios aqui mencionados, existem ainda dois métodos distintos que foram os usados no âmbito desta dissertação e que irão ser abordados nos pontos seguintes. A escolha desses dois métodos em detrimento dos outros prende-se com a disponibilidade do material no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, e ainda com a hipótese de testar a aplicabilidade do método de fotografia digital, sendo este uma inovação.

5.2 Parâmetros caracterizadores da topografia das superfícies

Os principais parâmetros que habitualmente se utilizam na caracterização da topografia de uma superfície são os seguintes (24):

- Rugosidade média, R_a : representa o desvio médio absoluto das irregularidades da superfície; é um parâmetro fácil de calcular que permite obter uma boa descrição da variabilidade de alturas do perfil e de fácil medição.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (5.2)$$

- Máximo valor dos picos, R_p : representa o máximo valor em altura acima da linha média ao longo de todo o comprimento do perfil.
- Máximo valor dos vales: R_v , representa o máximo valor em profundidade abaixo da linha média, ao longo de todo o comprimento do perfil.

- Altura máxima do perfil: R_t , representa a máxima altura do perfil.

$$R_t = R_p - R_v \quad (5.3)$$

- Desvio quadrático médio, R_q , representa o desvio padrão da distribuição das alturas, sendo assim um parâmetro importante para descrever a rugosidade estatisticamente.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (5.4)$$

Para além destes parâmetros é ainda possível, após a obtenção dos resultados dos ensaios, proceder a uma análise da topografia da superfície, isto é, deduzir a forma e o nível de rugosidade dos perfis. Assim, as asperezas podem ser classificadas segundo duas escalas (20):

- Primárias: quando ocorrem ondulações;
- Secundárias: quando ocorrem irregularidades.

Segundo estas duas classificações, podemos então definir a rugosidade como uma medida de irregularidades e ondulações em relação ao seu plano médio. Assim, tal como já foi referido, podemos caracterizar a rugosidade segundo dois aspetos:

- Forma:
 - Degraus;
 - Ondulado;
 - Plana.
- Rugosidade:
 - Rugosa;
 - Lisa;
 - Espelhada.

Também é ainda possível caracterizar a rugosidade de uma superfície tendo em conta a sua textura. Em geral existem dois tipos distintos de textura (22):

- Micro-textura: 1µm-0.5 mm
- Macro-textura: 0.5-50 mm

Por último, outra questão importante na medição da geometria de uma superfície é o efeito do ruído. Assim, o ruído é um problema significativo na caracterização da rugosidade em métodos em que não exista contacto, pois nestas medições é acrescentada uma componente adicional de variação que irá aumentar a rugosidade aparente. No entanto, quando se realizam vários ensaios, é possível determinar o grau de ruído presente em cada ensaio, através da comparação de resultados obtidos entre eles (25).

Para se efetuar a caracterização de rugosidade nos três tipos de pedra abordados ao longo deste trabalho optou-se por duas técnicas diferentes, de modo a possibilitar posteriormente a sua comparação. Assim, utilizou-se um método 2D que apenas permite a obtenção de perfis e por uma técnica 3D, mais complexa, que permite a análise de uma superfície completa. Nos dois subcapítulos seguintes serão abordados esses dois métodos bem como os resultados obtidos para cada um deles.

5.3 Caracterização da superfície com recurso ao laser SICK

Um dos métodos mais práticos para a obtenção da rugosidade de uma superfície é através de um sistema 2D de não contacto. É aqui que se integra a técnica proposta para a obtenção das várias rugosidades dos diferentes tipos de pedra de granito abordados, que consiste na utilização de um sensor laser “SICK sensick OD value”, cujas principais características técnicas se apresentam na tabela 15.

Tabela 15 - Características técnicas laser SICK.

SICK sensick OD value	
Voltagem	15 V
Frequência de medição	2 kHz
Resolução feixe luminoso	1 mm
Programa para obtenção dos dados	See It



Figura 69 - Laser SICK.

Em todas as superfícies a caracterizar definiu-se uma janela para a realização dos perfis. A janela definida para o ensaio tinha as dimensões de $24 \times 36 \text{ mm}^2$, tendo-se optado por estas dimensões para se obter a mesma janela em ambos os tipos de ensaio realizados. Considerando estas dimensões foi possível realizar perfis com 4 mm de espaçamento, sendo que horizontalmente se obtiveram 5 perfis e verticalmente 8 perfis. Importa ainda referir que o ensaio de realizou a uma velocidade constante de 1 mm/s.

Em suma, para todas as superfícies realizou-se o mesmo número de perfis, com o mesmo espaçamento. Após isso, foi calculada a média dos parâmetros obtidos para os perfis horizontais e os verticais, sendo que os parâmetros de rugosidade foram calculados para todos os perfis horizontais e verticais, calculando-se posteriormente a média horizontal e vertical de todos os perfis. De seguida mostram-se os resultados obtidos, bem como os perfis obtidos para cada superfície estudada.



Figura 70 - Ensaio com laser SICK.

5.3.1 Resultados

Nesta secção pretende-se mostrar os resultados obtidos para vários perfis horizontais e verticais realizados nos diferentes tipos de superfície. Posteriormente estes resultados serão discutidos e comparados com os resultados obtidos para as mesmas superfícies usando a técnica alternativa proposta. De referir que os gráficos obtidos mostram as cotas bem como o tamanho do perfil realizado em milímetros. Adicionalmente, considerando cada uma das superfícies caracterizadas, estas foram divididas em perfis horizontais e verticais, obtendo-se os valores para os parâmetros de rugosidade para cada perfil.

5.3.1.1 Superfície serrada

"V" serrado

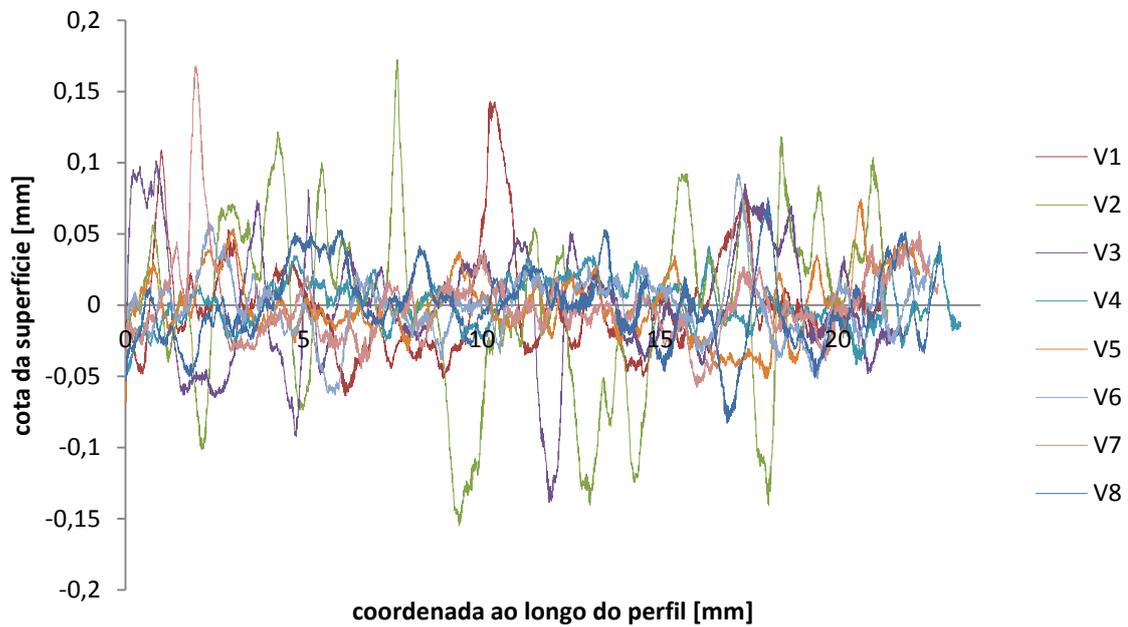


Figura 71 - Perfis verticais obtidos na superfície serrada.

Tabela 16 - Valores obtidos para perfis verticais na superfície serrada (mm).

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_a	0,0248	0,0478	0,0327	0,013	0,0176	0,0166	0,0184	0,0202
R_q	0,0005	0,0008	0,0006	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004
R_v	-0,064	-0,155	-0,139	-0,047	-0,068	-0,063	-0,058	-0,083
R_p	0,1429	0,1724	0,1012	0,0419	0,0745	0,0922	0,168	0,0754
R_t	0,2067	0,3274	0,2399	0,0885	0,1428	0,1555	0,2259	0,1584

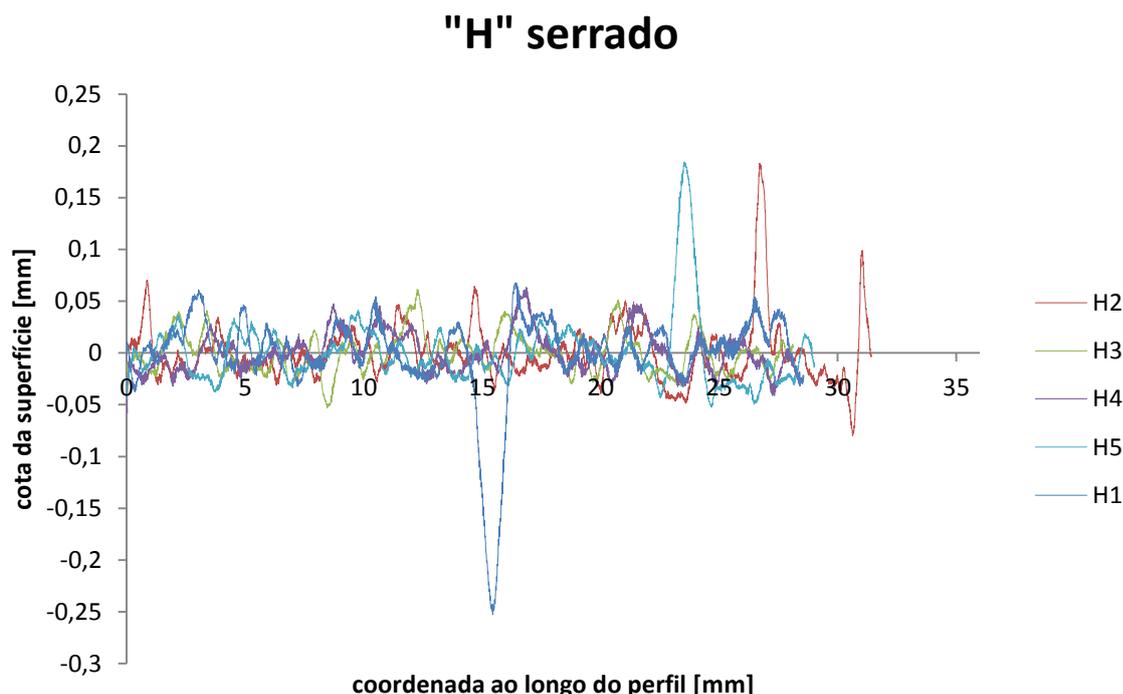


Figura 72 - Perfis horizontais obtidos na superfície serrada.

Tabela 17 - Valores obtidos para perfis horizontais na superfície serrada (mm).

	H1	H2	H3	H4	H5
R_a	0,0193	0,015	0,0149	0,0208	0,0239
R_q	0,0003	0,0002	0,0002	0,0004	0,0005
R_v	-0,08	-0,053	-0,058	-0,052	-0,253
R_p	0,1833	0,0613	0,0632	0,1845	0,0679
R_t	0,2634	0,1146	0,1213	0,2367	0,3205

Relativamente ao ensaio realizado na superfície serrada com recurso ao laser Sick, observa-se que os valores obtidos (tabela 16 e 17) se encontram numa escala abaixo do milímetro para a rugosidade média, para a altura máxima dos picos e a dos vales, o que desde logo parece traduzir o tipo de superfície em estudo. Quando observados os gráficos obtidos durante os ensaios (figura 71 e 72), verifica-se que as curvas obtidas se encontram sempre próximas umas relativamente às outras. No entanto em certos pontos verificam-se variações significativas, o que tanto pode traduzir ou numa maior profundidade do pico ou vale, como pode ter como causa a passagem do laser sobre um cristal e a não reflexão correta desse mesmo ponto, atingindo-se aparentemente maior profundidade ou altura.

Quanto ao valor da rugosidade média, este varia entre o máximo de 0.0478 mm e o mínimo de 0.013 mm. Relativamente aos valores máximos de pico e de vale, obteve-se, respetivamente os valores de 0.1845 mm e de 0.253 mm obtidos no perfil H5.

5.3.1.2 Superfície em jato de areia

"V" Jato de areia

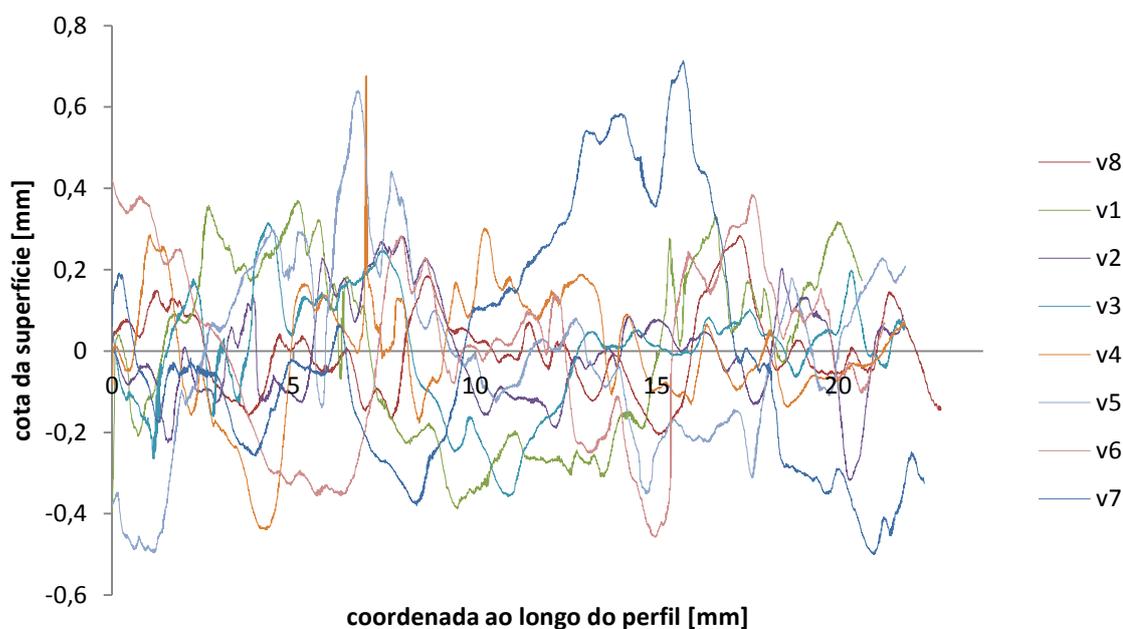


Figura 73 - Perfis verticais obtidos na superfície jato de areia.

Tabela 18 - Valores obtidos para perfis verticais na superfície jato de areia.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_a	0,1972	0,1002	0,1069	0,1151	0,177	0,1824	0,2465	0,0797
R_q	0,0028	0,0016	0,0018	0,002	0,003	0,0029	0,004	0,0014
R_v	-0,395	-0,318	-0,359	-0,44	-0,497	-0,458	-0,5	-0,207
R_p	0,3703	0,2821	0,3163	0,6774	0,6401	0,4215	0,7141	0,2851
R_t	0,7651	0,6003	0,6756	1,1174	1,1367	0,8796	1,2143	0,4918

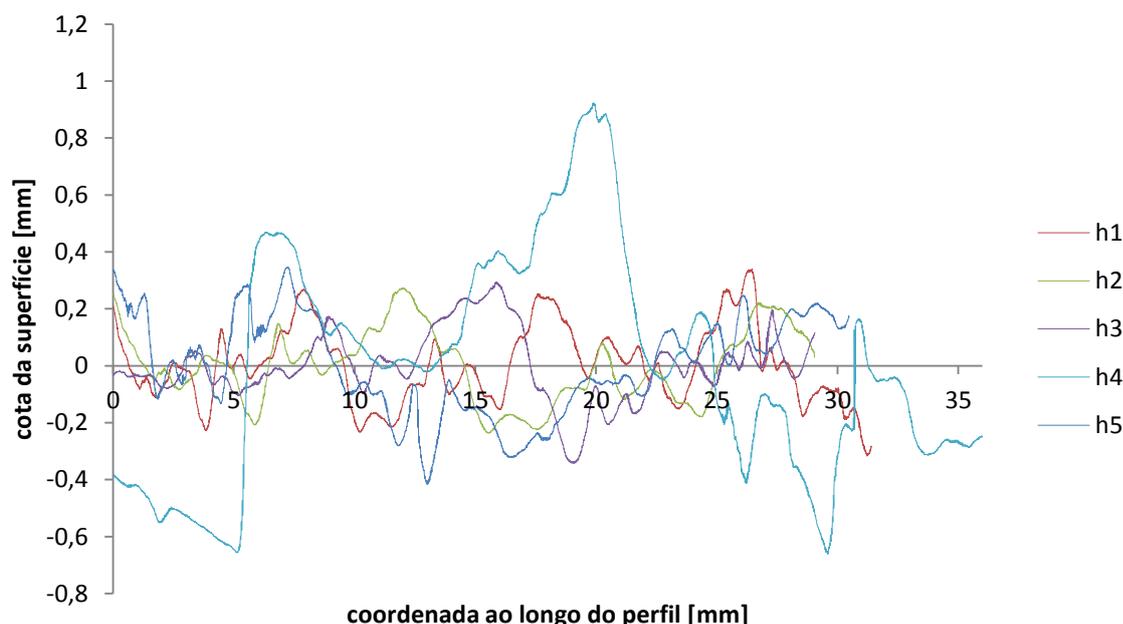
"H" jato de areia

Figura 74 - Perfis horizontais obtidos na superfície jato de areia.

Tabela 19 - Valores obtidos para perfis horizontais na superfície jato de areia.

	H1	H2	H3	H4	H5
R_a	0,1048	0,1031	0,0899	0,3072	0,1437
R_q	0,0014	0,0016	0,0015	0,0053	0,0022
R_v	-0,317	-0,237	-0,342	-0,661	-0,416
R_p	0,3409	0,2733	0,2949	0,924	0,3467
R_t	0,6576	0,5099	0,6372	1,585	0,7626

No que diz respeito ao ensaio de laser realizado na superfície de jato de areia, podemos à partida analisar a verossimilhança deste relativamente ao ensaio realizado na superfície serrada, pois os resultados obtidos apresentam um acréscimo muito significativo. Analisando as tabela 18 e 19, constatamos que o valor da rugosidade média varia entre um máximo de 0.3072 mm obtido no perfil H4 e um mínimo obtido no perfil V8 de 0.0797 mm. No que respeita aos valores máximos de pico e de vale estes são de 0.924 mm e 0.661 mm respectivamente, que correspondem ao perfil H4. Por último, a máxima altura do perfil resultou do perfil H4, com um valor de 1.585 mm.

Ainda relativamente a este ensaio, podemos desde logo observar uma maior variabilidade dos perfis obtidos (figura 73 e 74) quando comparados com os perfis da superfície serrada, que

pode ter como causa a menor regularidade da superfície em estudo o processo de tratamento a que foi sujeita.

5.3.1.3 Superfície bujardada

"V" bujardada

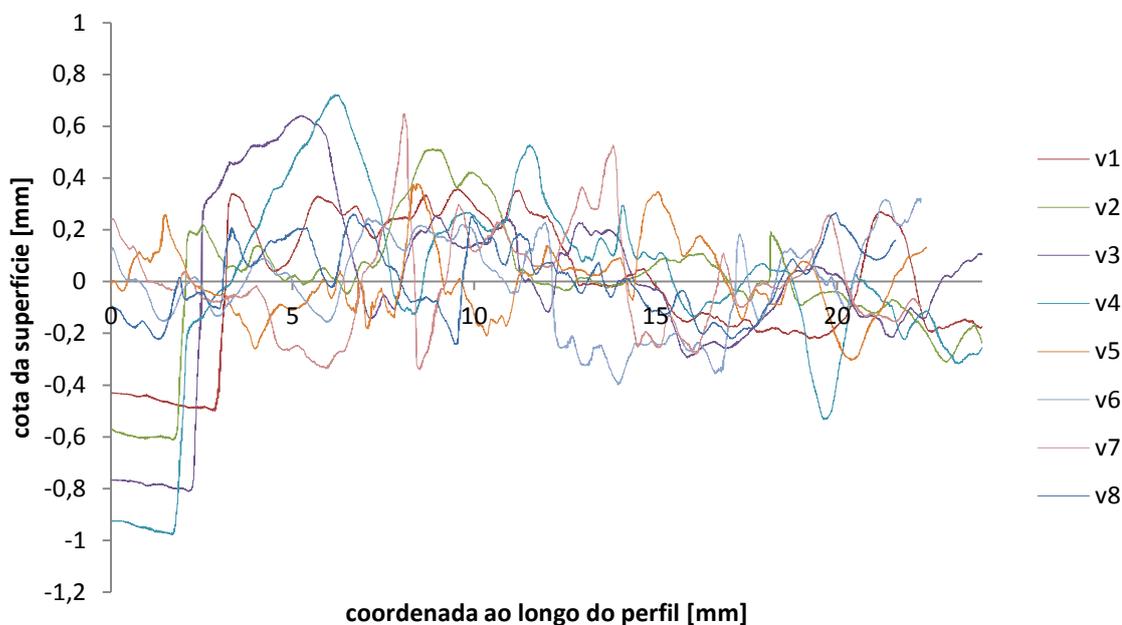


Figura 75 - Perfis verticais obtidos na superfície bujardada.

Tabela 20 - Valores obtidos para perfis verticais na superfície bujardada.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_a	0,2165	0,1614	0,2519	0,2749	0,107	0,1472	0,1525	0,1148
R_q	0,0035	0,0033	0,0048	0,0052	0,0018	0,0024	0,0026	0,0018
R_v	-0,501	-0,613	-0,812	-0,979	-0,304	-0,399	-0,341	-0,243
R_p	0,3578	0,5135	0,6414	0,7227	0,378	0,3223	0,6487	0,2658
R_t	0,8588	1,1263	1,453	1,7018	0,682	0,7214	0,9898	0,5089

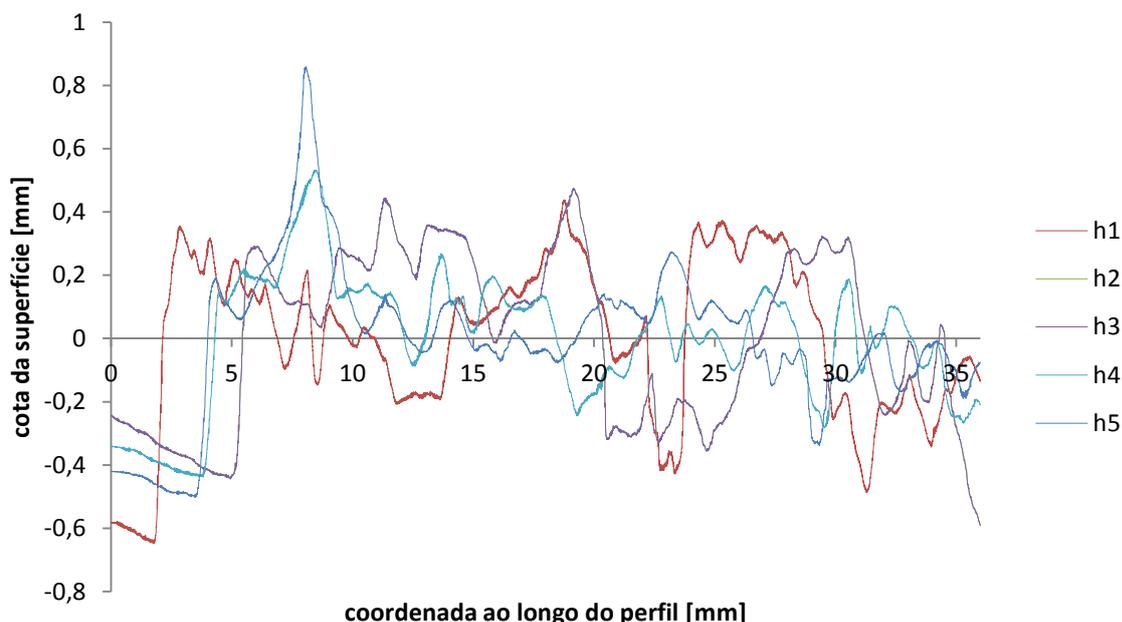
"H" bujardada

Figura 76 - Perfis horizontais obtidos na superfície bujardada.

Tabela 21 - Valores obtidos para perfis horizontais na superfície bujardada.

	H1	H2	H3	H4	H5
R_a	0,2093	0,2405	0,2405	0,1608	0,1607
R_q	0,0029	0,0037	0,0037	0,0028	0,0032
R_v	-0,648	-0,591	-0,591	-0,438	-0,502
R_p	0,4389	0,4752	0,4752	0,5325	0,8584
R_t	1,0872	1,0661	1,0661	0,9709	1,3608

O último ensaio realizado com recurso ao laser Sick teve como alvo a superfície aparentemente mais rugosa deste estudo. Assim, analisando com maior detalhe esta superfície pode constatar-se que os resultados obtidos confirmaram a análise por inspeção visual, uma vez que quando comparada com os perfis obtidos nos ensaios das superfícies serrada e jato de areia se obteve valores mais elevados de rugosidade média. Ainda, e analisando as tabelas 20 e 21, pode-se constatar que o valor máximo de rugosidade média é de 0.2749 mm e é obtido no perfil V4. Relativamente ao máximo valor de pico e de vale, estes são de 0.8584 mm e 0.979 mm respectivamente. Por último importa dar ênfase ao parâmetro de máxima altura do perfil. Aqui, encontramos o valor máximo no perfil V4, com um valor de 1.7018 mm e o valor mais baixo obtido no perfil V8 com 0.5089 mm.

Concluídos os três ensaios aqui realizados, podemos desde já concluir acerca da sua exatidão, pois tal como era expectável, obteve-se valores mais altos de rugosidade média na superfície serrada, seguida da superfície de jato de areia e por ultimo na superfície serrada.

5.4 Caracterização da superfície com recurso à fotografia digital

Nesta secção aborda-se uma metodologia proposta alternativa à anterior e às existentes que permite fazer a caracterização 3D da superfície em questão, tendo a vantagem de não necessitar de contacto e de permitir obter uma superfície tridimensional que permite uma interpretação de resultados mais fácil e a identificação dos vários tipos de rugosidade descritos anteriormente.

O ensaio consiste na realização de várias fotografias com recurso a uma máquina fotográfica de elevada resolução com uma lente macro. O procedimento aqui executado consistiu na captura de uma fotografia para um deslocamento do plano focal de 5 $\mu\text{m/s}$. Para cada tipo de superfície foi considerada uma janela de ensaio de 24x36 mm^2 , tal como no ensaio anterior, sendo que a janela de ensaio não se alterou.



Figura 77 - Esquema de ensaio para levantamento fotográfico da superfície a analisar.

O processamento dos resultados obtidos realizou-se com recurso ao programa “MeshLab”. Este é um software 3D avançado para o processamento de malhas de pontos. O “MeshLab” é

ainda usado em diversos contextos como a microbiologia, reconstrução de superfícies, microbiologia, ortodontia e pesquisas sobre o património cultural (26).

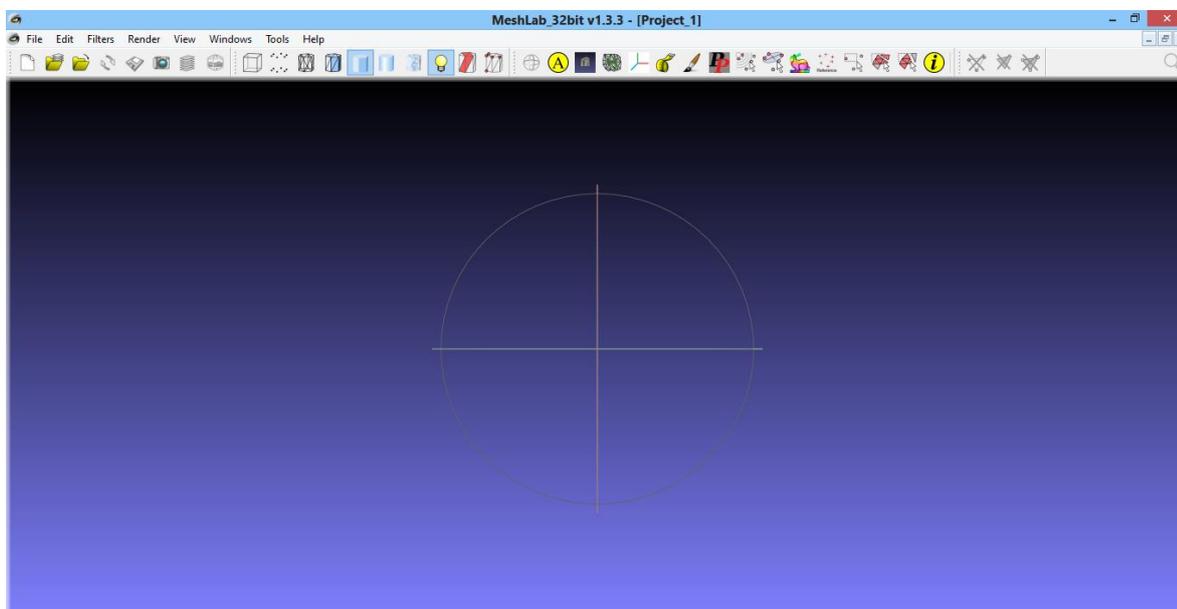


Figura 78 - Programa usado para obtenção dos perfis.

5.4.1 Resultados

Nesta secção pretende-se apresentar os resultados obtidos para os vários perfis horizontais e verticais realizados nos diferentes tipos de superfície, com recurso à técnica da fotografia digital, mostrando-se também imagens das diferentes superfícies que resultaram destes ensaios. Posteriormente proceder-se-á à análise destes resultados e à sua comparação com os obtidos por intermédio da técnica anterior. Importa ainda salientar que os gráficos obtidos apresentam as cotas e a distância de cada perfil realizado, em milímetros. Adicionalmente, para cada superfície, realizou-se uma sequência de perfis horizontais e verticais, tendo-se calculado os valores dos parâmetros de rugosidade para cada perfil.

5.4.1.1 Superfície serrada

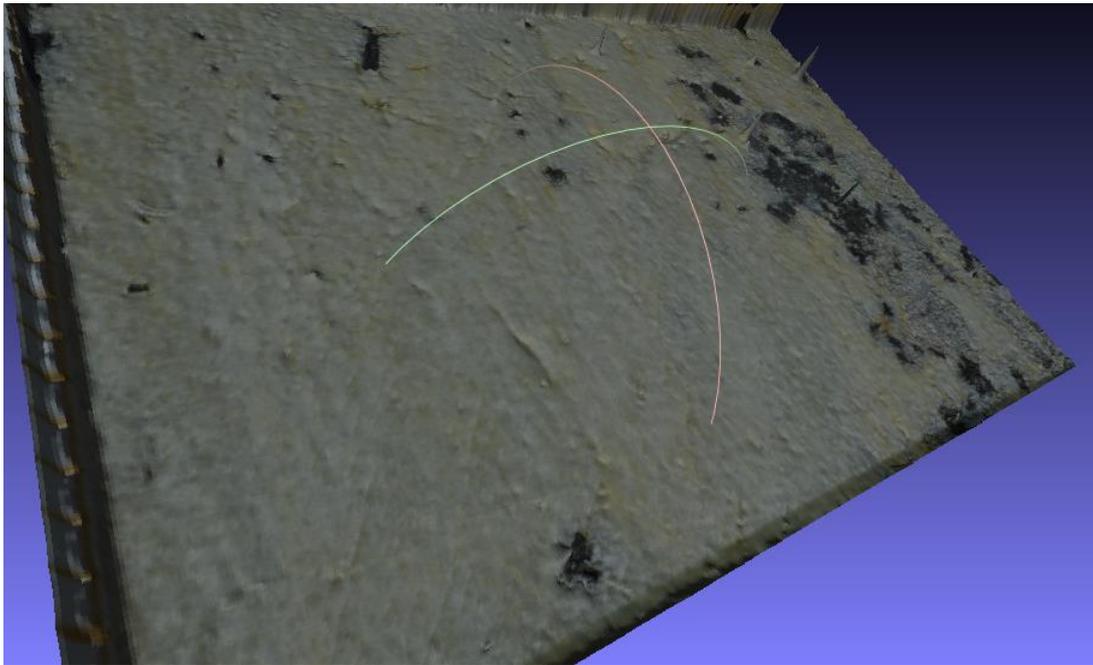


Figura 79 - Modelo tridimensional da superfície serrada.

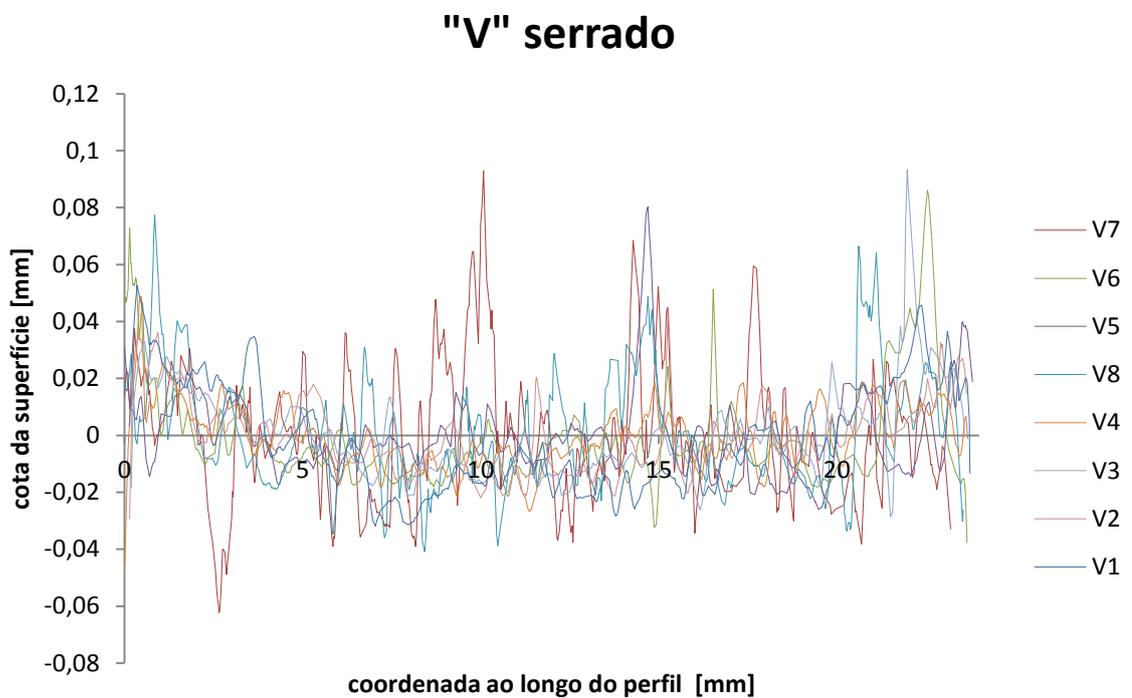


Figura 80 - Perfis verticais obtidos na superfície serrada.

Tabela 22 - Resultados dos parâmetros de rugosidade obtidos para a superfície serrada (mm).

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_a	0,0153	0,0105	0,011	0,0089	0,0104	0,013	0,0182	0,0156
R_q	0,0008	0,0006	0,0006	0,0003	0,0006	0,0008	0,001	0,0009
R_v	-0,032	-0,029	-0,029	-0,047	-0,026	-0,038	-0,062	-0,041
R_p	0,0526	0,0449	0,0934	0,0488	0,0802	0,0861	0,093	0,0774
R_t	0,0845	0,0741	0,122	0,0954	0,1063	0,1239	0,1552	0,1183

"H" serrado

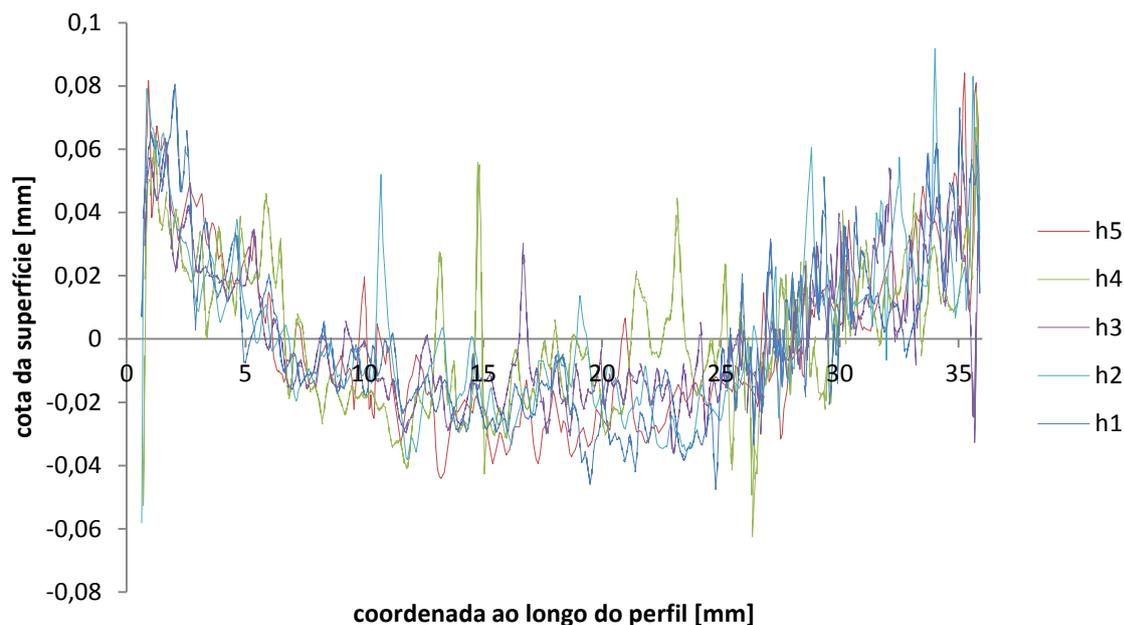


Figura 81 - Perfis horizontais obtidos na superfície serrada.

Tabela 23 - Resultados obtidos nos perfis horizontais nos ensaios de superfície serrada (mm).

	H1	H2	H3	H4	H5
R_a	0,0218	0,02	0,017	0,0185	0,0231
R_q	0,0008	0,001	0,0006	0,0007	0,0011
R_v	-0,048	-0,058	-0,036	-0,063	-0,044
R_p	0,0806	0,0918	0,0626	0,0781	0,0841
R_t	0,1282	0,1498	0,0989	0,1407	0,1282

Relativamente ao ensaio realizado nesta secção recorrendo à fotografia digital, em primeiro lugar podemos reparar que o modelo tridimensional aqui apresentado traduz efectivamente a superfície real. Numa análise detalhada do modelo deparamo-nos com alguns picos na superfície que podem estar relacionados com os cristais presentes na pedra, que acabam por produzir ruído na aquisição da forma da superfície.

No que respeita aos perfis realizados verticalmente, analisando a tabela 22 e a figura 80, podemos reparar na aproximação dos valores obtidos e das respectivas curvas, o que parece coerente uma vez que estamos perante uma superfície bastante uniforme. Aqui, obteve-se um valor máximo para a rugosidade média 0.0182 mm, obtido no perfil V7. Relativamente aos máximos valores de pico e vale, obtiveram-se os valores de 0.0934 mm e 0.062 mm, respetivamente. No que respeita à máxima altura do perfil, o valor máximo registado foi de 0.1552 mm e o mínimo foi de 0.0741 mm.

Quanto aos perfis horizontais, e tendo em conta a curva e os valores obtidos nos ensaios de fotografia para esta superfície (ver figura 81 e tabela 23), desde logo observamos que este apresenta uma ligeira curvatura, o que poderá ser influenciado pela óptica da lente usada. No entanto, e analisando os valores obtidos e a proximidade das curvas, este parece ser válido. Assim, no que respeita aos valores máximos obtidos, a rugosidade média mais elevada foi registada no perfil H5, com um valor de 0.0231 mm. O máximo valor de vale encontra-se no perfil H4, registando-se um valor de 0.063 mm, enquanto que o máximo valor de pico e máxima altura do perfil encontram-se no perfil H2, com valores de 0.0918 mm e 0.1498 mm respetivamente.

5.4.1.2 Superfíciejato de areia

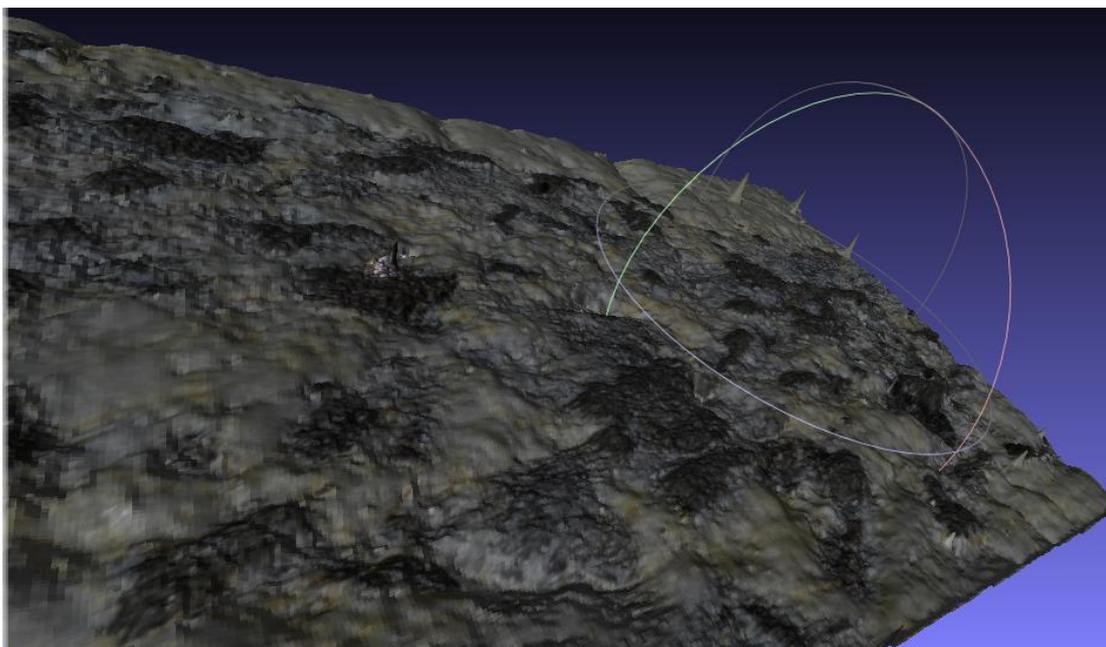


Figura 82 – Modelo tridimensional da superfície jato de areia.

"V" Jato areia

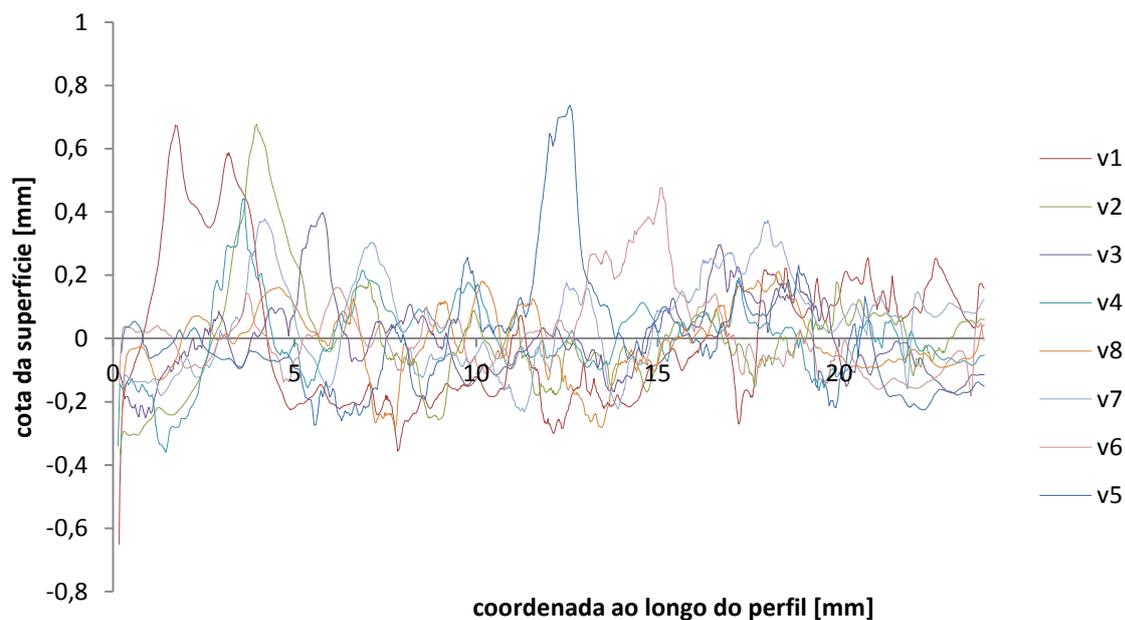


Figura 83 - Perfis verticais obtidos na superfície jato de areia.

Tabela 24 - Resultados obtidos nos perfis verticais nos ensaios de superfície de jato de areia (mm).

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_a	0,1847	0,1174	0,096	0,0929	0,127	0,0902	0,1288	0,0863
R_q	0,0069	0,0053	0,0038	0,0038	0,0057	0,0039	0,0048	0,0033
R_v	-0,651	-0,367	-0,251	-0,36	-0,275	-0,182	-0,232	-0,29
R_p	0,6747	0,6763	0,3977	0,4422	0,7375	0,4764	0,3777	0,2125
R_t	1,3253	1,0429	0,6484	0,802	1,012	0,6582	0,6101	0,5021

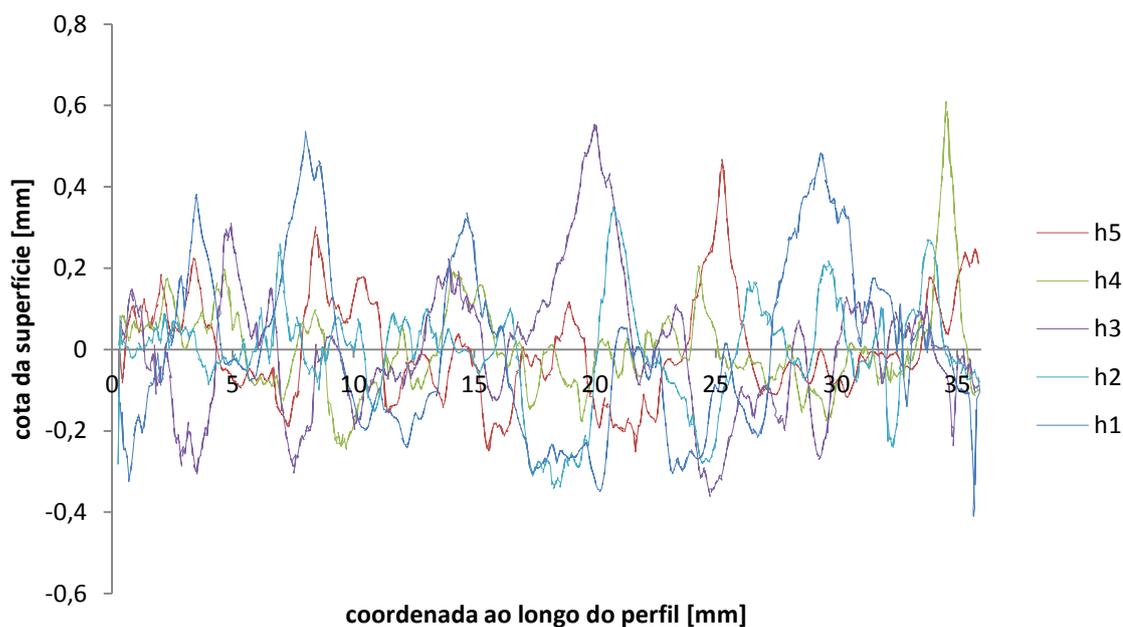
"H" Jato areia

Figura 84 - Perfis horizontais obtidos na superfície jato de areia.

Tabela 25 - Resultados obtidos nos perfis horizontais nos ensaios de jato de areia (mm).

	H1	H2	H3	H4	H5
R_a	0,1719	0,0922	0,1296	0,0797	0,0993
R_q	0,0065	0,004	0,0053	0,0034	0,0039
R_v	-0,41	-0,341	-0,361	-0,246	-0,252
R_p	0,5359	0,3507	0,5543	0,61	0,4678
R_t	0,9455	0,6919	0,9156	0,8556	0,7201

No que diz respeito à superfície jato de areia podemos, através da observação do modelo tridimensional (ver figura 82), afirmar que se trata de uma representação razoavelmente fiel da superfície real. No entanto e tal como anteriormente, observam-se alguns picos ao longo do modelo que não são reais e que traduzem ruído no sinal adquirido, provavelmente devido à presença de cristais de quartzo na superfície de granito que são de mais difícil caracterização em termos óticos.

Assim, tendo em conta a verosimilhança do modelo apresentado, foi possível obter os vários perfis verticais e horizontais ao longo da superfície, como demonstrado na figura 82 e na figura 84. Neste caso podemos desde logo observar que, quando comparamos com a superfície serrada, existe uma maior dispersão de medições nos vários perfis, o que traduz a

realidade uma vez que este tipo de tratamento de superfície tende a resultar em superfícies consideravelmente mais irregulares e mais rugosas.

Relativamente aos valores máximos e mínimos alcançados podemos, através da análise das tabelas 24 e 25, analisar cada parâmetro independentemente. Assim, a rugosidade média variou entre um valor máximo de 0.1874 mm e um valor mínimo de 0.0797 mm. No que respeita aos valores máximos e mínimos dos vales e dos picos, obteve-se respetivamente 0.651 mm e 0.182 mm para os vales e 0.7375 mm e 0.2125 mm para os picos. Por último, o valor máximo obtido para a altura máxima do perfil resultou do perfil V1 com um valor de 1.3253 mm.

5.4.1.3 Superfície bujardada

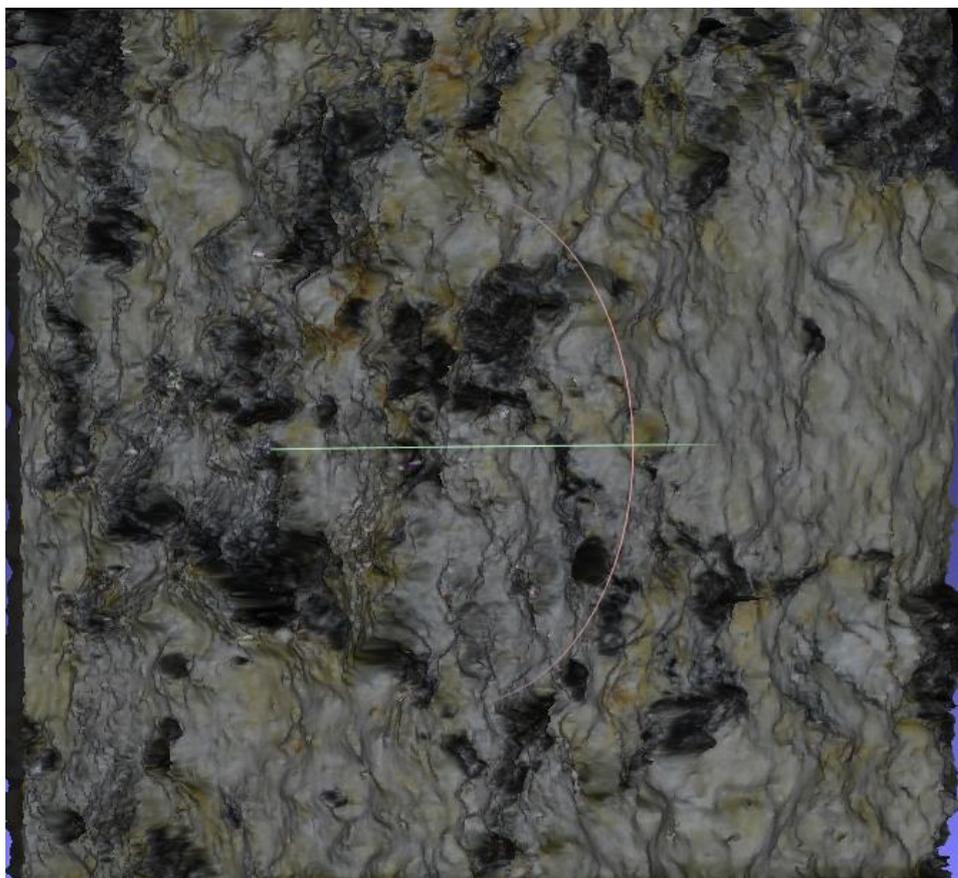


Figura 85 – Modelo tridimensional da superfície bujardada.

"V" bujardada

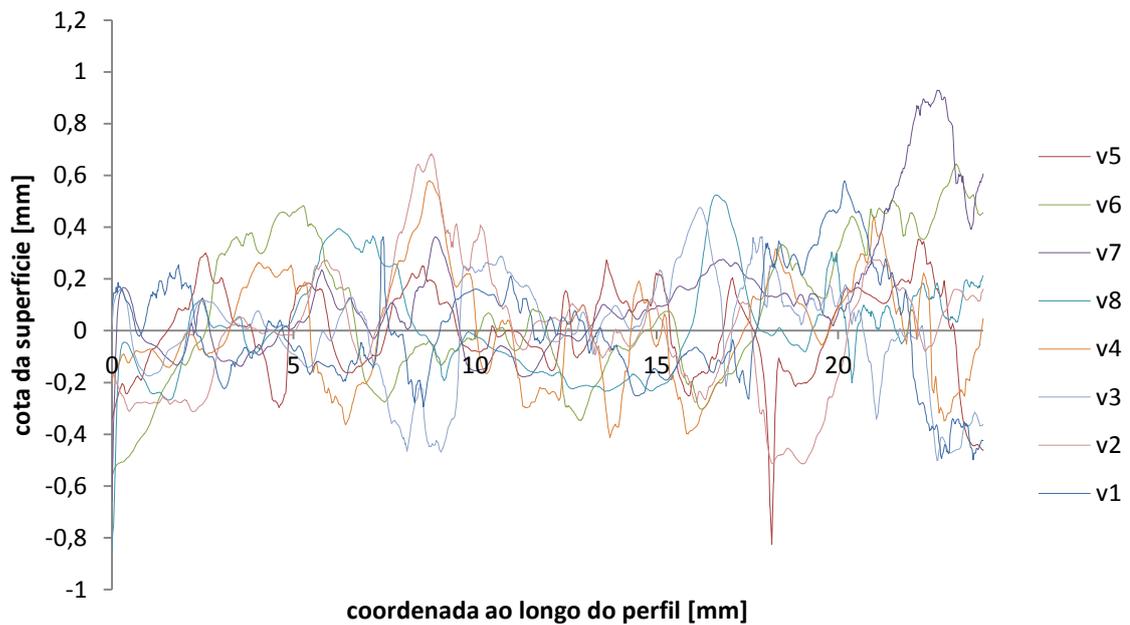


Figura 86 - Perfis verticais obtidos na superfície bujardada.

Tabela 26 - Resultados obtidos nos perfis verticais na superfície bujardada (mm).

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
R_a	0,1676	0,1843	0,158	0,177	0,14	0,2353	0,1818	0,1489
R_q	0,0066	0,0076	0,0065	0,0067	0,0054	0,009	0,0086	0,006
R_v	-0,499	-0,515	-0,503	-0,413	-0,825	-0,563	-0,658	-0,85
R_p	0,579	0,684	0,4772	0,5803	0,3538	0,6441	0,9299	0,5247
R_t	1,078	1,1985	0,9797	0,9931	1,1791	1,2072	1,5882	1,3747

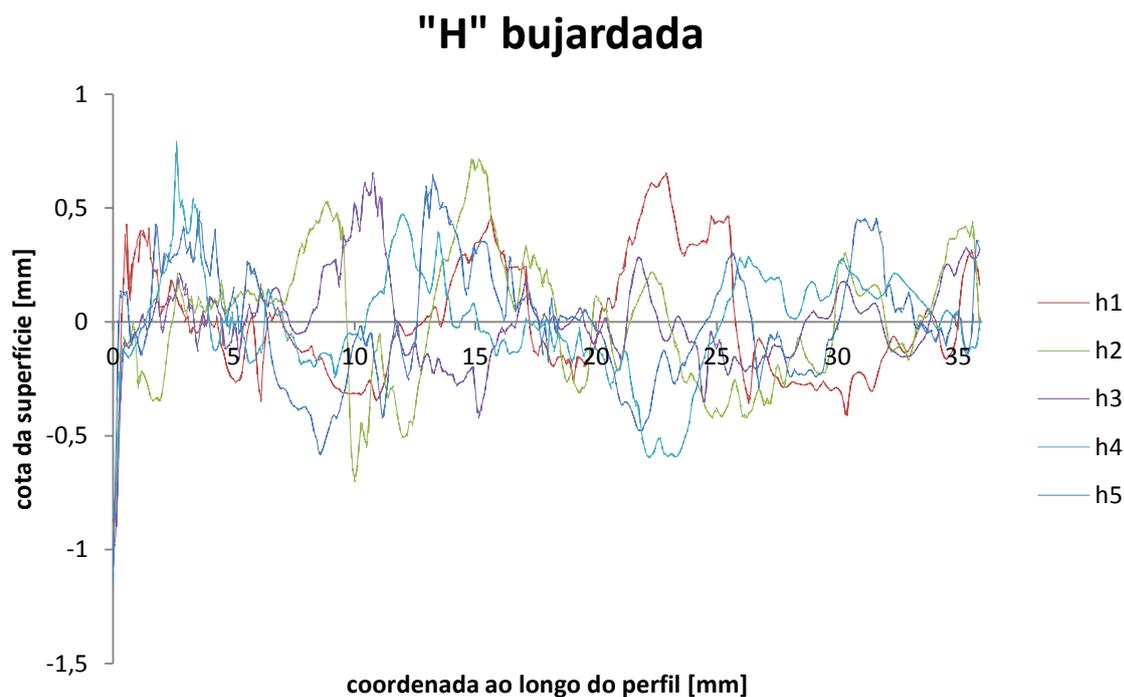


Figura 87 - Perfis horizontais obtidos na superfície bujardada.

Tabela 27 - Resultados obtidos nos perfis horizontais nos ensaios de superfície bujardada (mm).

	H1	H2	H3	H4	H5
R_a	0,2152	0,2389	0,1413	0,1755	0,2064
R_q	0,0082	0,0091	0,0062	0,0073	0,0082
R_v	-0,93	-0,934	-1,036	-0,87	-1,194
R_p	0,6552	0,717	0,6568	0,7937	0,6482
R_t	1,5854	1,651	1,693	1,6639	1,8423

Por último, foram realizados os ensaios com recurso a fotografia digital na superfície bujardada. Através do modelo tridimensional obtido, podemos desde logo concluir que este é representativo da superfície quando comparado com a superfície real e com os modelos anteriormente obtidos.

No que respeita aos valores adquiridos através do programa “MeshLab”, também podemos concluir que o modelo representa a superfície bujardada, e exemplo disso são os perfis representados na figuras 86 e 87. Aqui, após uma análise, conseguimos observar as diferenças entre estes perfis e os obtidos nessa superfície e os obtidos anteriormente.

Quanto aos valores resultantes da análise desta superfície (ver tabelas 26 e 27) podemos também, quando comparamos com as superfícies anteriores, comprovar que estes são representativos desta superfície. Assim, no que respeita aos valores da rugosidade média, o valor máximo de 0.2353 mm regista-se no perfil V6. Quanto ao máximo valor de vale, regista-se o valor de 0.85 mm no perfil V8. Relativamente ao valor de pico e altura do perfil máximos, ambos são registados no perfil V7 para os valores de 0.9299 mm e 1.5882 mm respetivamente.

Relativamente aos perfis horizontais, o valor máximo da rugosidade média é de 0.2389 mm e diz respeito ao perfil H2, o máximo valor de vale e máxima altura do perfil são registados no perfil H5 e assumem os valores 1.194 mm e 1.8423 mm respetivamente. O máximo valor de pico é de 0.7937 mm e regista-se no perfil H4.

Observando todos os ensaios realizados para as superfícies serrada, jato de areia e bujardada, e tendo em conta os perfis obtidos, os modelos tridimensionais obtidos assim como os resultados dos vários parâmetros, podemos concluir que a caracterização da superfície recorrendo à fotografia digital é adequada e exata. Relativamente à caracterização recorrendo ao sensor laser, apresenta a vantagem de fornecer informação relativamente à topografia da superfície a um nível tridimensional.

5.5 Discussão de resultados

Através dos resultados obtidos e apresentados anteriormente, é possível calcular os valores médios dos parâmetros obtidos para os vários perfis horizontais e verticais, para cada tipo de superfície, tanto para os ensaios realizados com o laser como para os realizados com recurso à fotografia digital. Assim, nas tabelas 28 e 29 apresentam-se os valores médios obtidos para os parâmetros de rugosidade em análise, para cada tipo de superfície e orientação do perfil.

Tabela 28 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos com a técnica do laser (mm).

	Superfície serrada		Superfície jato de areia		Superfície bujardada	
	H	V	H	V	H	V
R_a	0,018779	0,023332	0,149728	0,150528	0,202359	0,180947
R_q	0,000342	0,000411	0,002396	0,002434	0,003269	0,003183
R_v	-0,09927	-0,08621	-0,39449	-0,3965	-0,55417	-0,52735
R_p	0,112046	0,108947	0,43597	0,46032	0,55602	0,489569
R_t	0,211316	0,195159	0,830464	0,856819	1,110188	1,016916

Tabela 29 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos com a técnica de fotografia digital (mm).

	Superfície serrada		Superfície jato de areia		Superfície bujardada	
	H	V	H	V	H	V
R_a	0,020088	0,013677	0,114552	0,115308	0,195463	0,176488
R_q	0,000866	0,00073	0,004631	0,004692	0,007812	0,007118
R_v	-0,04971	-0,03922	-0,322	-0,32534	-0,99294	-0,6465
R_p	0,079435	0,07287	0,503731	0,499852	0,694157	0,60745
R_t	0,129145	0,112095	0,825734	0,825188	1,687093	1,253955

Analisando os valores apresentados podemos constatar que, para os dois métodos, obtivemos valores dos parâmetros em análise ligeiramente diferentes. No sentido de permitir uma análise mais detalhada dos resultados, procedeu-se numa fase subsequente à análise gráfica de perfis independentes e aleatórios.

Ainda, no que diz respeito às tabelas 28 e 29, podemos desde já concluir que os valores médios para os parâmetros presentes nos diferentes métodos se encontram próximos, o que desde logo permite concluir que ambos os métodos resultam na obtenção de parâmetros de rugosidade representativos e razoáveis.

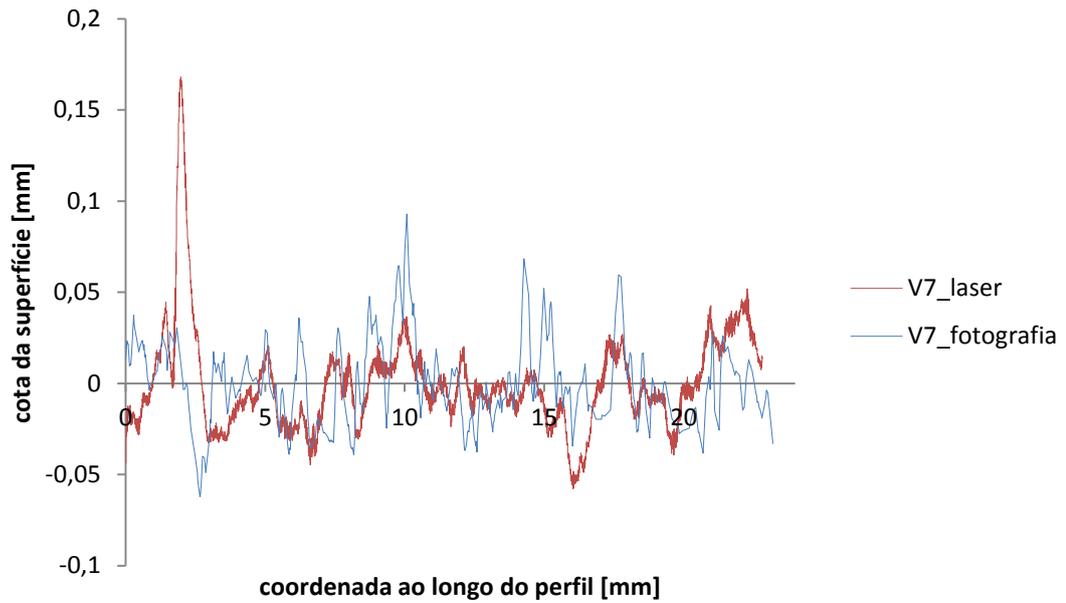


Figura 88 - Comparação dos perfis V7 na superfície serrada.

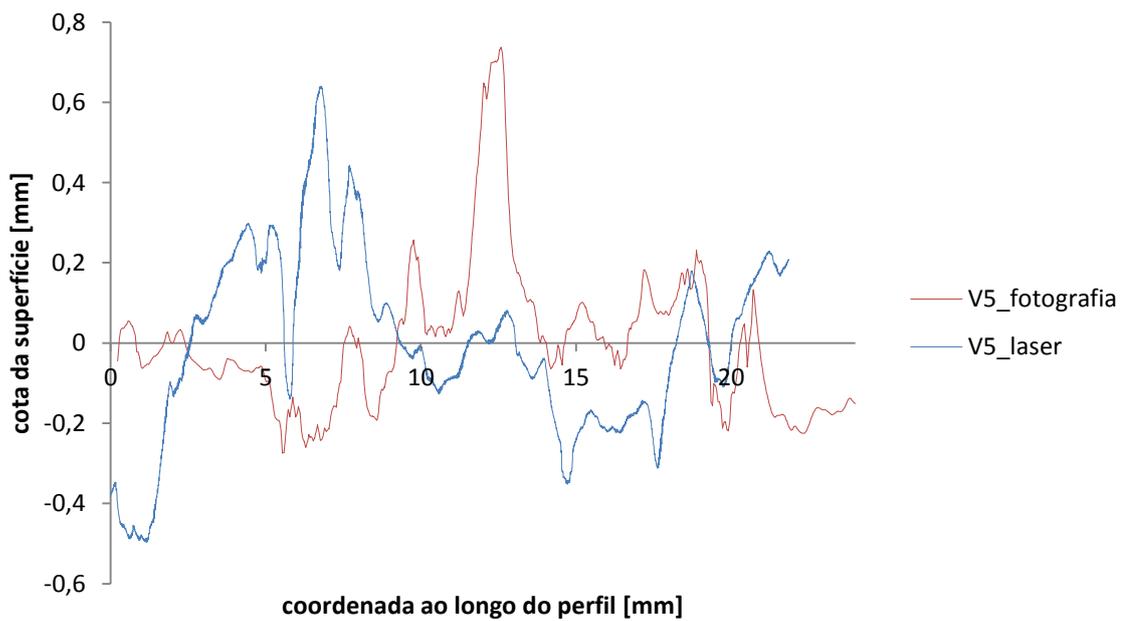


Figura 89 - Comparação dos perfis V5 na superfície jato de areia.

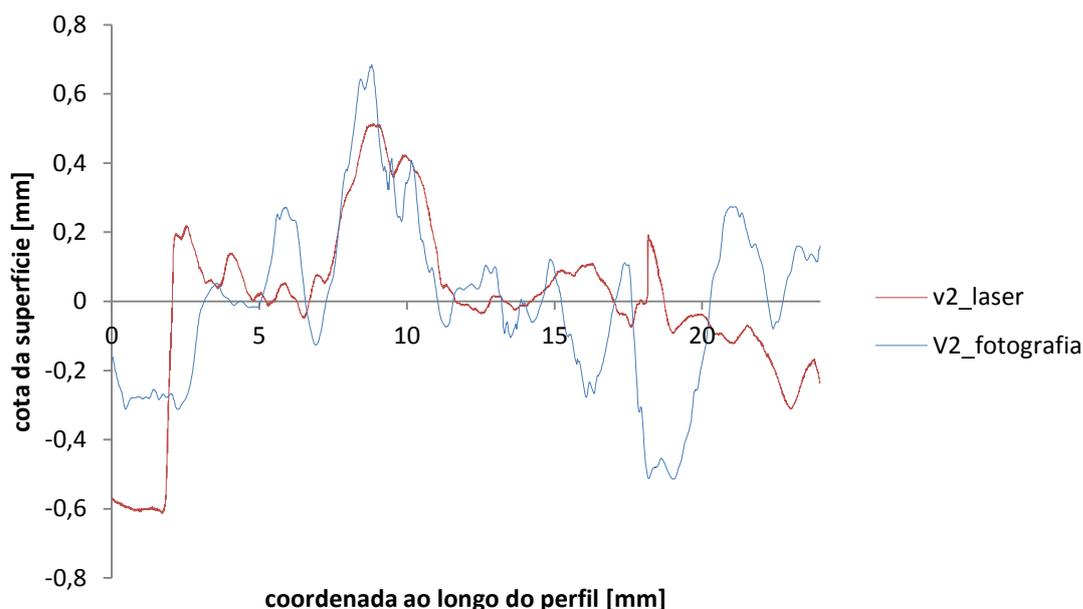


Figura 90 - Comparação dos perfis V2 na superfície bujardada.

Quando efetuadas as comparações entre perfis (ver figuras 88, 89 e 90) pode-se constatar que em nenhum caso se obteve a completa identidade entre ambos os perfis, sendo que podem existir diversas causas que podem levar a que isso mesmo aconteça. O primeiro factor que pode originar divergência nos resultados obtidos está relacionado com a largura do feixe luminoso do laser, que neste caso é de $0,5 \times 1,0$ mm. Isto pode resultar numa medição que não garante a posição exata do perfil que pretendemos comparar.

Por forma a explorar com maior detalhe esta particularidade, foram realizados vários perfis paralelos ao longo de uma largura na direção transversal aos perfis de 1,0 mm, numa determinada zona aleatória. Os perfis obtidos foram comparados com o perfil realizado com o laser, cuja largura do feixe é igual a 1,0mm. Os resultados obtidos para as três superfícies diferentes encontram-se representados nas figuras 91 a 93.

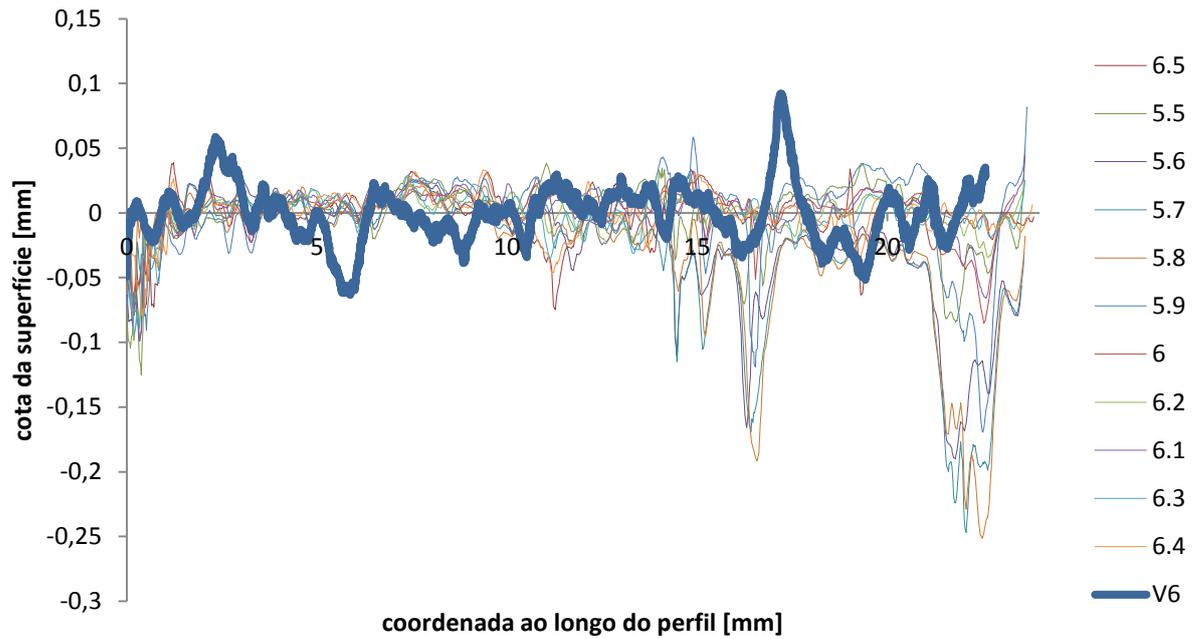


Figura 91 - Comparação dos perfis V6 ao longo de uma largura de 1 mm na superfície serrada.

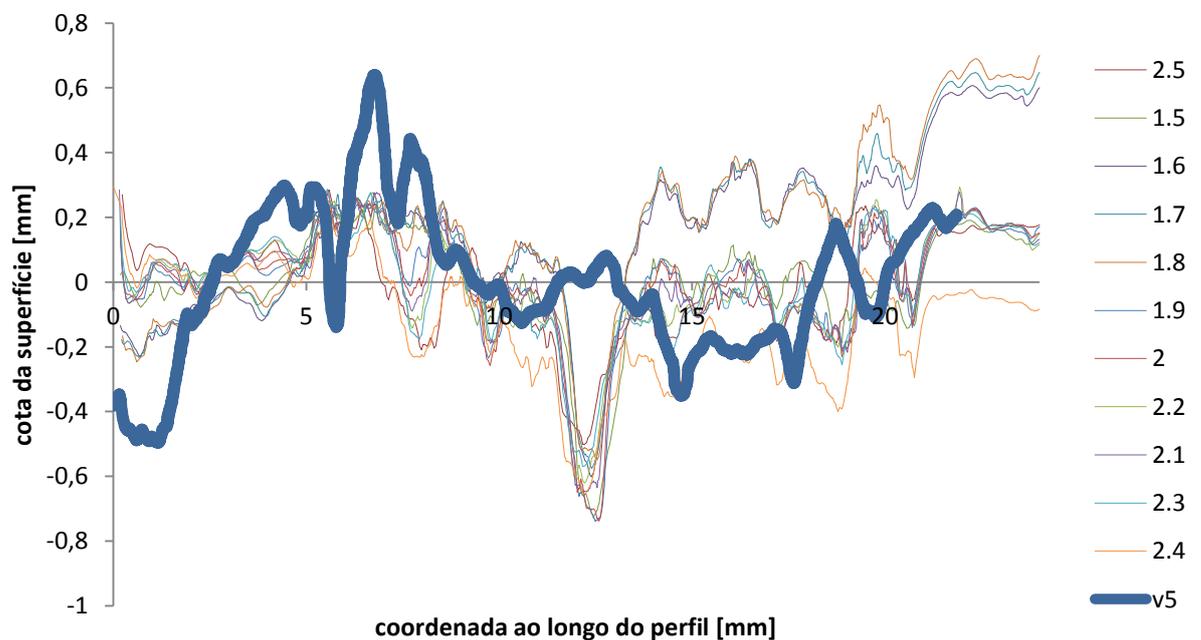


Figura 92 - Comparação dos perfis V5 ao longo de uma largura de 1mm na superfície jato de areia.

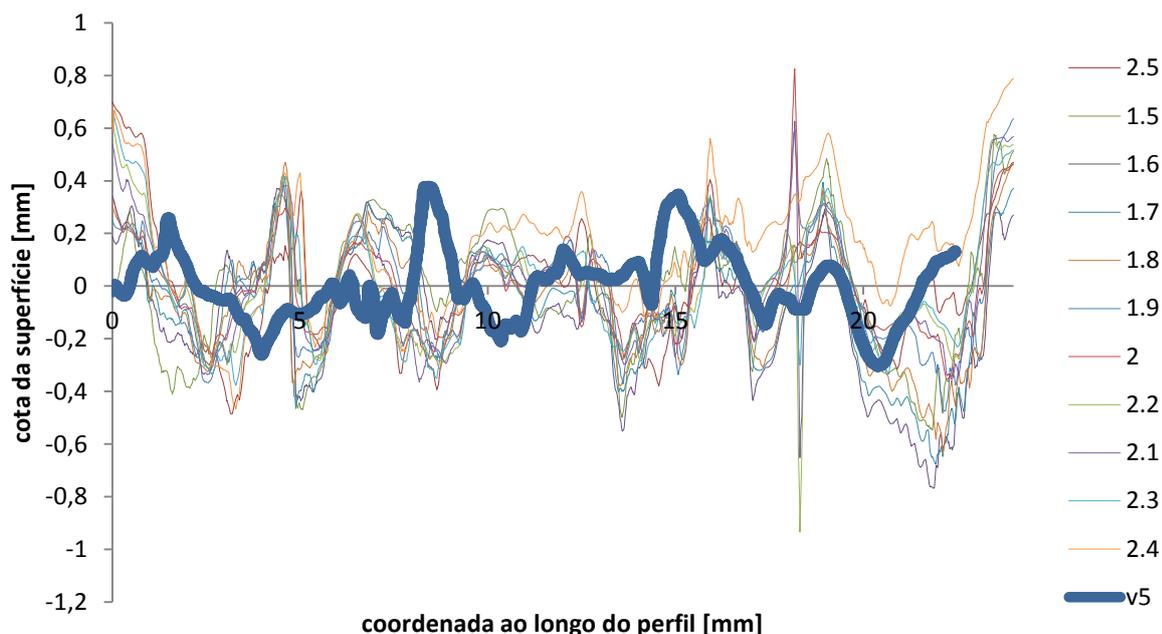


Figura 93 - Comparação dos perfis V5 ao longo de um milímetro de largura na superfície bujardada.

Comparando os perfis obtidos através do laser e os perfis obtidos através dos ensaios realizados com fotografia digital e recorrendo a diversos perfis dentro da largura de ensaio do feixe luminoso do laser usado, podemos concluir que os ensaios de laser e fotografia digital se complementam e, em certas zonas, os resultados são aproximadamente idênticos. No entanto isto não ocorre em toda a extensão dos perfis, e em algumas zonas a disparidade de resultados mesmo dentro da largura do feixe luminoso é considerável, o que pode levar a concluir que haverá outros fatores de erro envolvidos. Entre outras, algumas fontes de erro possíveis são: precisão insuficiente do sistema adotado para definir a posição dos perfis, isto é, da régua usada para determinar o espaçamento entre perfis; a possibilidade de o laser não se encontrar em posição perfeitamente perpendicular à superfície de granito a caracterizar, os alinhamentos dos perfis poderão não ter correspondido exatamente às direções pretendidas, e em alguns casos estes poderão mesmo ter-se afastado da largura de um milímetro.

Ainda assim, é possível considerar que ambos os resultados obtidos são válidos pois de acordo com o estudo analítico os parâmetros de avaliação da rugosidade não apresentam grande disparidade, mesmo tendo em conta que a resolução do feixe de laser é baixa. Considerando a escala das tortuosidades a caracterizar.

Considerando a necessidade de manter o carácter prático dos sistemas de caracterização das superfícies a analisar, é de salientar que o método de laser é muito mais expedito e rápido. A técnica com recurso a fotografia digital, apesar de mais complexo e mais demorado, tem a grande vantagem de permitir obter um modelo tridimensional da superfície, o que em muitos casos poderá ser uma grande vantagem e o fator de decisão na escolha do método a usar.

6 Influência da rugosidade no comportamento mecânico da interface

Neste capítulo pretende-se avaliar a relação entre os parâmetros que caracterizam a rugosidade das superfícies estudadas por intermédio de ambos os métodos de caracterização utilizados, e os resultados obtidos experimentalmente relativos ao comportamento mecânico da interface. Nesta análise consideram-se sobretudo três parâmetros: a tensão tangencial de pico, a tensão tangencial residual e a área limitada pela resposta força-deslizamento, que está diretamente relacionada com a energia dissipada (E) durante o processo de propagação da fenda e rotura em modo II. Para além deste três parâmetros, avaliou-se a necessidade de relacionar a rugosidade com outros três valores que permitem determinar o comportamento mecânico da interface entre substrato e material de reforço. Assim, também se teve em consideração os valores obtidos através da aproximação das curvas de Mohr aos pontos obtidos nos ensaios de corte, sendo portanto considerados para este capítulo ainda os ângulos de atrito das diferentes superfícies, a coesão e valores de resistência à tracção, alcançados através do algoritmo “Trust-Region” do Matlab.

No que diz respeito aos parâmetros de rugosidade a analisar, foram considerados a rugosidade média e a altura máxima dos perfis. Importa ainda salientar que, tanto para os parâmetros de rugosidade como para os parâmetros do comportamento mecânico da interface, se considerou valores médios de todos os parâmetros obtidos anteriormente, obtendo-se os valores dados na tabelas 30 e 31.

Tabela 30 - Valores médios dos parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios de corte.

Superfícies	τ_p [MPa]	τ_r [MPa]	E	Φ [°]	χ [MPa]	c [MPa]
Serrada	3,4984	1,09215	49,38339	34,454	1,82	2,324
Jato de areia	4,0714	1,492936	67,02396	42,5	0,6	2,02
Bujardada	4,4192	1,63263	97,36055	36,51	0,4	2,1

Tabela 31 - Valores médios obtidos dos parâmetros que caracterizam a rugosidade.

Superfície	Laser		Fotografia	
	R _a [mm]	R _t [mm]	R _a [mm]	R _t [mm]
Serrada	0.0211	0.1105	0.0169	0.0762
Jato Areia	0.1501	0.4481	0.1149	0.5018
Bujardada	0.1917	0.5228	0.186	0.6508

Seguidamente avalia-se a relação entre os parâmetros que caracterizam a rugosidade obtidos com recurso ao sensor laser, e os resultados obtidos nos ensaios de corte. Posteriormente avalia-se a relação entre os resultados obtidos na caracterização da superfície recorrendo à fotografia digital e os resultados dos ensaios de corte. Por último comparar-se-á as correlações obtidas quer nos ensaios com laser quer nos ensaios com fotografia digital.

6.1 Ensaio laser Sick vs ensaio de corte

Nesta secção procede-se à análise dos resultados relativos à caracterização das três superfícies recorrendo ao sensor laser e a sua relação com todos os parâmetros obtidos nos ensaios de corte, ou seja, a tensão tangencial de pico e residual, a energia dissipada durante o processo de rotura da interface por corte (E), o ângulo de atrito, a coesão e a aderência (resistência à tração). Os parâmetros considerados relativos à rugosidade das superfícies foram a rugosidade média, R_a e altura máxima do perfil, R_t.

Relativamente á relação entre os valores registados para a tensão residual e de pico, e a rugosidade média das superfícies ensaiadas (ver figura 94), podemos constatar que existe uma boa correlação entre ambos, o que demonstra que a rugosidade média tem influência direta nos valores das tensões de pico e residual obtidas nos ensaios de corte. Assim, para o grau de correlação entre a tensão de pico e a rugosidade média obteve-se um valor de 0.9783, e para o grau de correlação entre a tensão residual e a rugosidade média obteve-se um valor mais elevado e muito próximo de 1(0.9997).

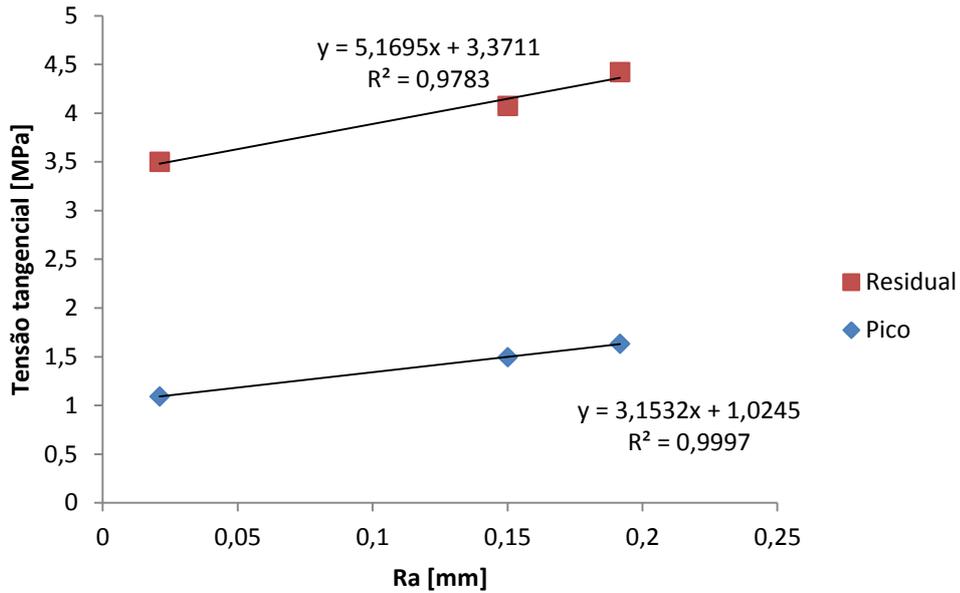


Figura 94 - Tensão de pico e residual vs rugosidade média, R_a .

No caso do parâmetro de rugosidade R_t na figura 95 observa-se que o coeficiente de correlação entre a tensão de pico e a altura máxima do perfil é de 0,9555, e o coeficiente de correlação entre a tensão residual e a altura máxima do perfil é de 0,9935, o que significa que este parâmetro de rugosidade está fortemente relacionado com as tensões de pico e residuais obtidas nos ensaios de corte para os vários tipos de superfície.

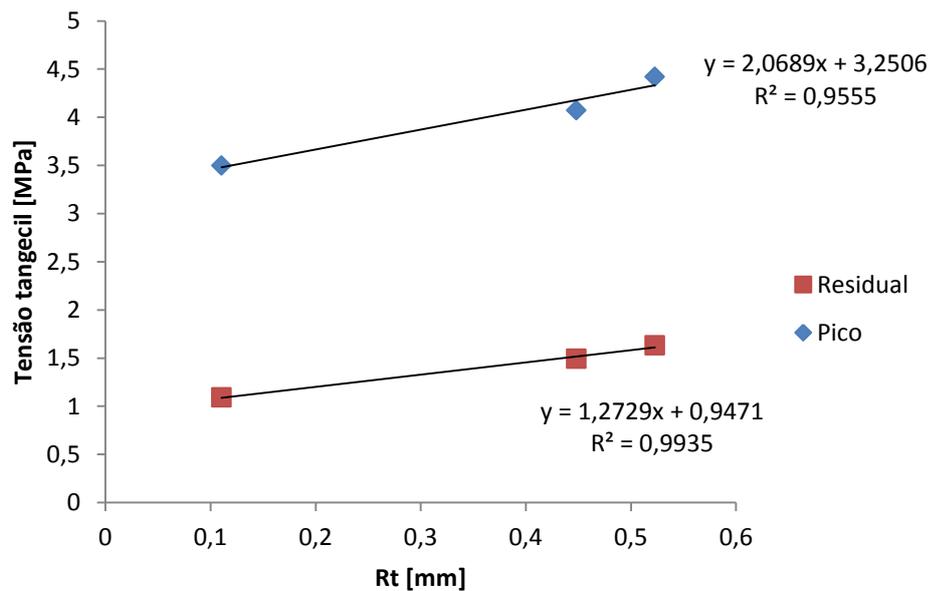


Figura 95 - Tensão de pico e residual vs altura máxima do perfil, R_t .

Relativamente à relação entre a energia dissipada durante o processo de rotura (figura 96), e os valores registados da rugosidade média, podemos desde logo observar que não estamos perante uma relação linear, aproximando-se assim esta correlação de um comportamento polinomial que necessitaria de mais ensaios para ser confirmado. Deste modo, não se nota diferença significativa da energia dissipada entre o caso da superfície lisa e da jato de areia, ao contrário do que acontece quando se compara a jato de areia e a bujardada, o que pode indiciar uma não dependência apenas da rugosidade mas também do tipo de tratamento a que cada superfície foi sujeita. Em particular, o tipo de tratamento da superfície poderá ter induzido danos micro-estruturais abaixo da superfície que poderão ter influenciado os resultados.

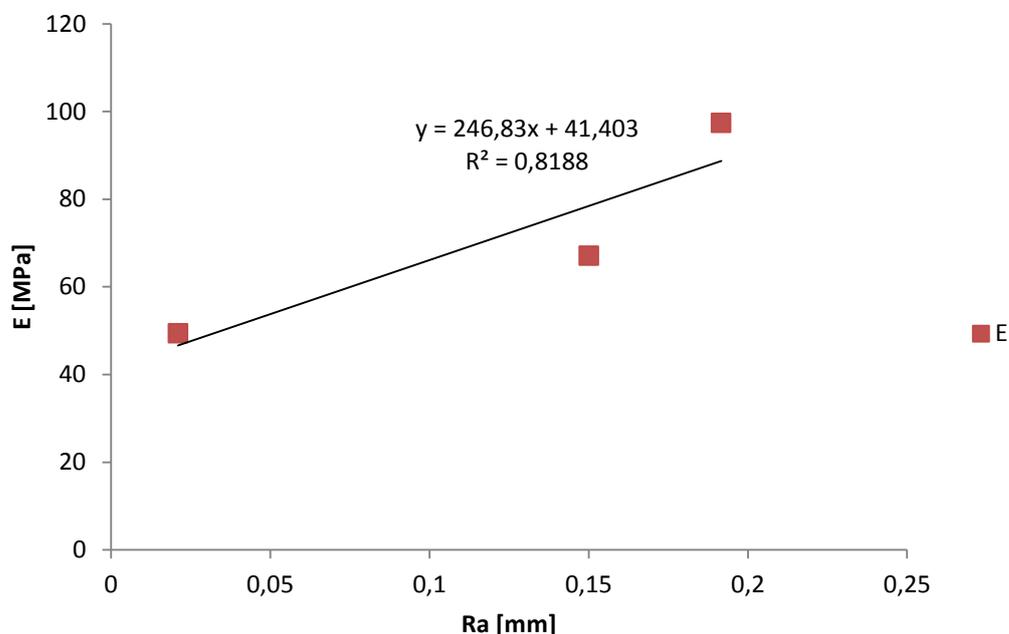


Figura 96 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) (E) vs rugosidade média R_a .

Considerando agora os valores registados para a altura máxima do perfil e a sua relação com os valores da energia dissipada durante o processo de rotura (figura 97), verifica-se novamente que a relação não é linear, o que conduz às mesmas observações que as enunciadas no caso anterior. Assim, o valor do grau de correlação entre a energia dissipada no processo de rotura por corte e a altura máxima do perfil é de 0.7664. Provavelmente não existirá uma dependência da energia dissipada apenas da rugosidade, mas o processo de tratamento da superfície poderá também ter influência nos resultados obtidos.

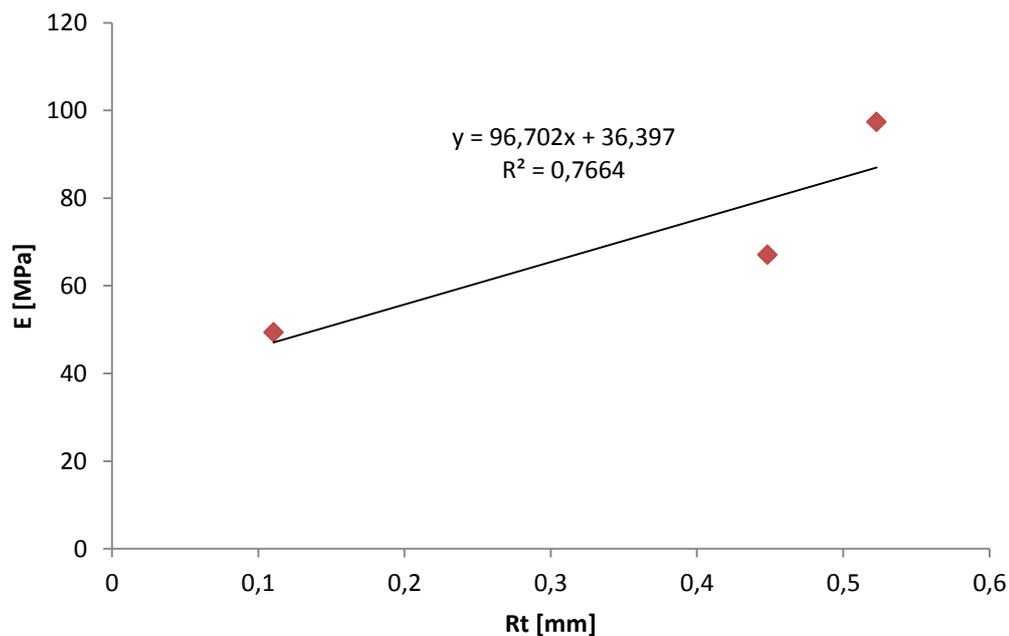


Figura 97 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) vs altura máxima do perfil R_t .

Relativamente às figuras 98 e 99, considerando os valores obtidos para o grau de correlação entre o ângulo de atrito e os parâmetros da rugosidade, observa-se que estes valores são muito baixos, tendo-se obtido um grau de correlação entre o ângulo de atrito e a rugosidade média de 0.2613, e entre o ângulo de atrito e a altura máxima do perfil de 0.3201. Possivelmente a menor resistência da matriz relativamente à do substrato produz um modo de rotura que se caracteriza por um plano de fenda totalmente contido na zona da argamassa, e deste modo a influência do substrato e das características de rugosidade da sua superfície resultam bastante menores.

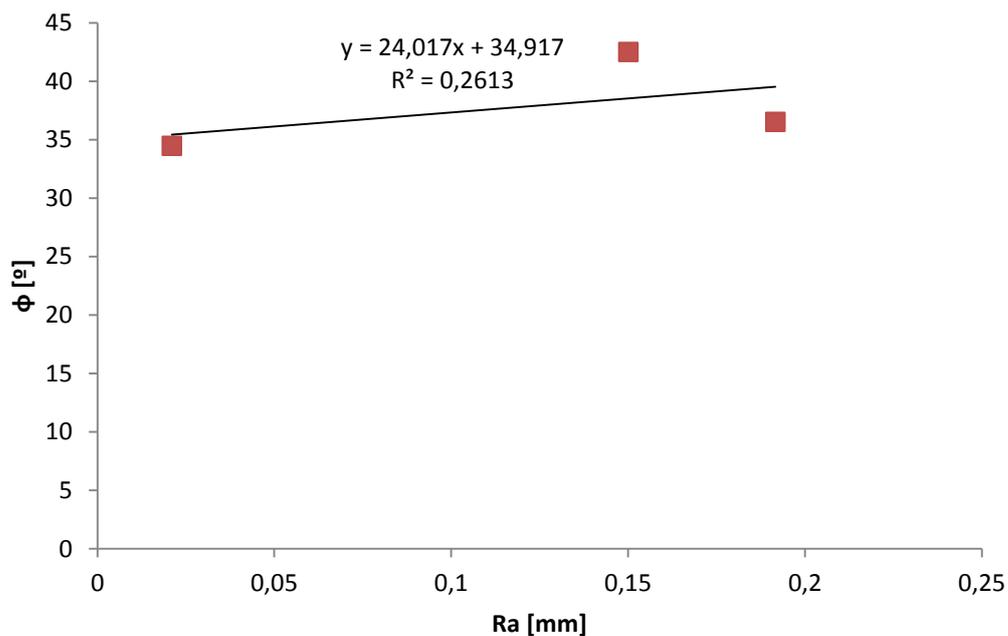


Figura 98 - Ângulo de atrito, ϕ vs rugosidade média, R_a .

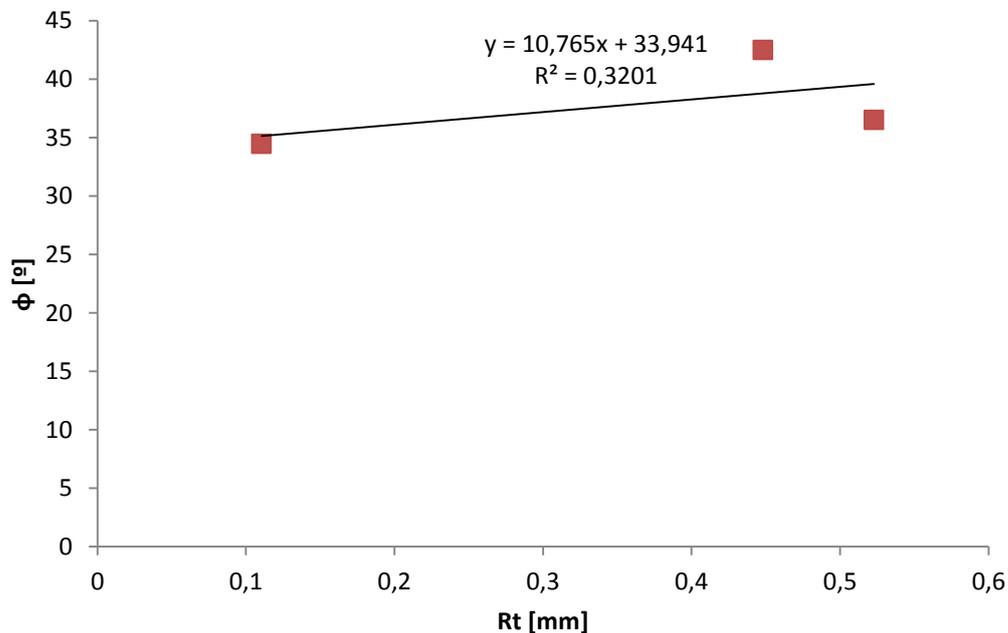


Figura 99 - Ângulo de atrito, ϕ vs altura máxima do perfil, R_t .

Em relação ao grau de correlação entre a resistência à tracção e os parâmetros da rugosidade (figuras 100 e 101), podemos concluir que a rugosidade tem influência direta na aderência do

material de reforço ao substrato, uma vez que estamos perante graus de correlação elevados. Assim, o valor obtido para o grau de correlação entre a resistência à tração e a rugosidade média foi de 0.989 e entre a resistência à tração e a altura máxima do perfil foi de 0.9984.

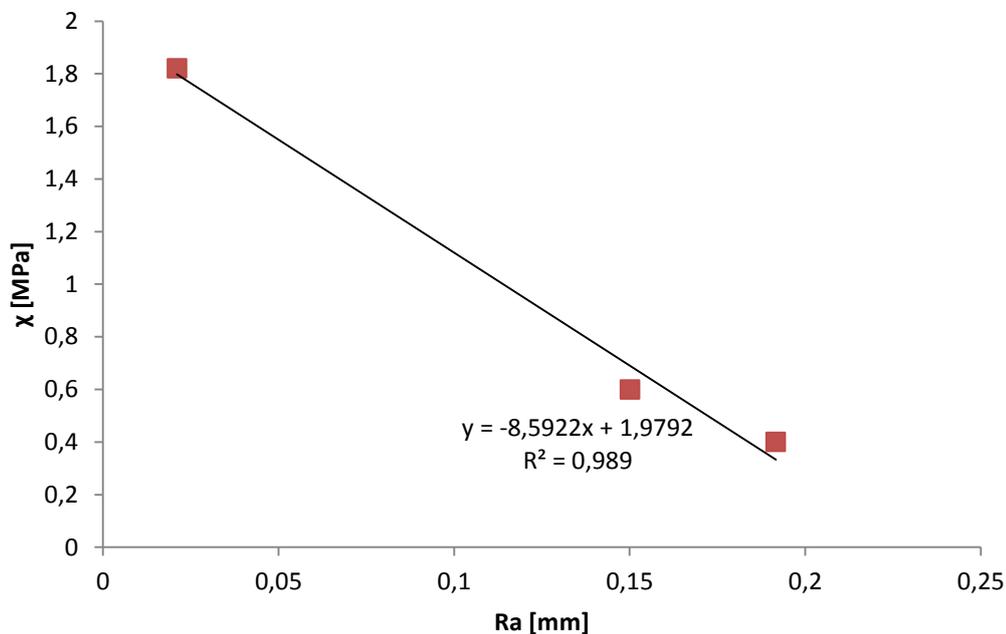


Figura 100 - Resistência à tração, χ vs rugosidade média, R_a .

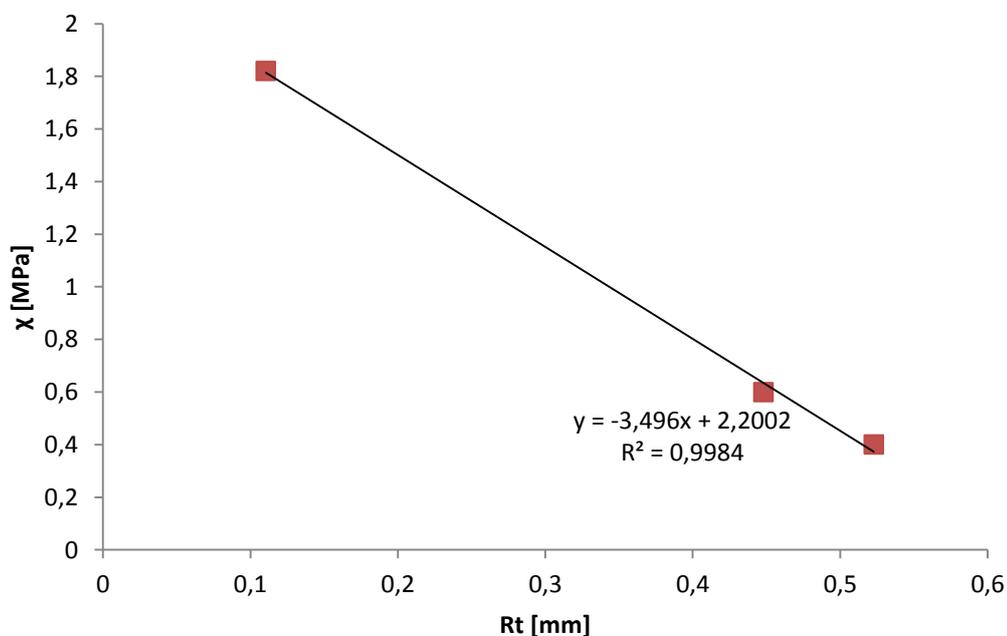


Figura 101 - Resistência à tração, χ vs altura máxima do perfil, R_t .

Quanto ao grau de correlação entre a coesão e os parâmetros de rugosidade, mais uma vez constata-se que a rugosidade não parece ter influencia direta. Assim, analisando as figuras 102 e 103, podemos observar que a função existente não é perfeitamente linear, não se obtendo assim valores para as correlações próximos de 1.

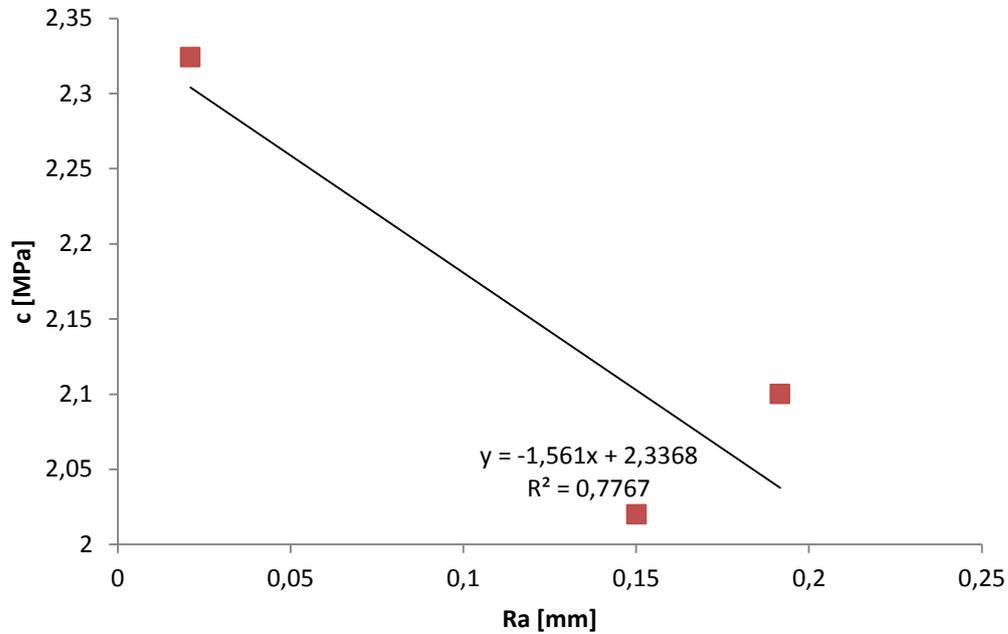


Figura 102 - Coesão, c, vs rugosidade média, R_a .

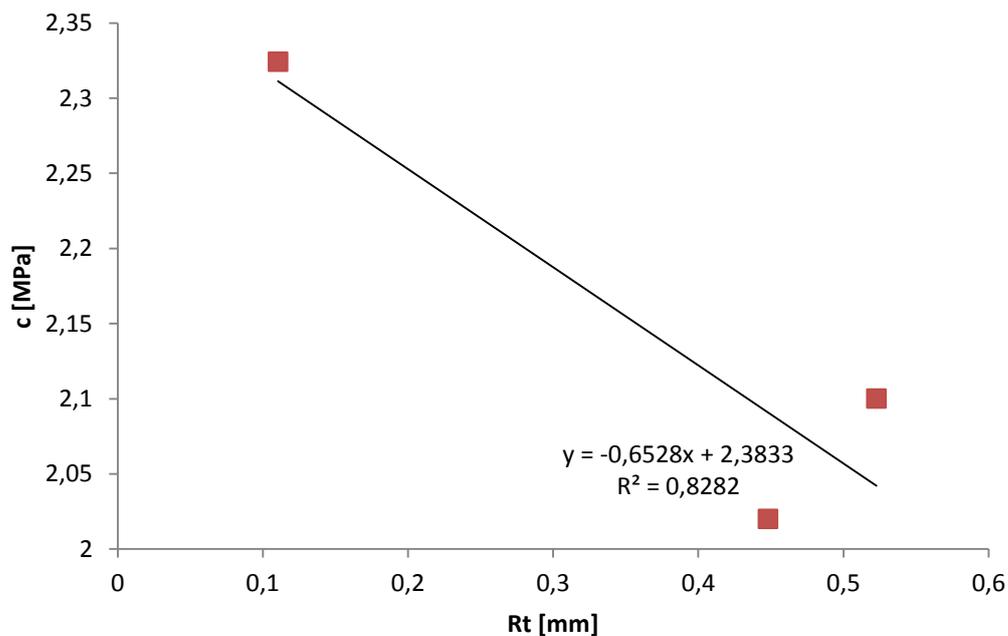


Figura 103 - coesão, c vs altura máxima do perfil, R_t .

6.2 Ensaio fotografia digital vs ensaio de corte

Nesta secção apresenta-se exclusivamente os resultados obtidos durante a caracterização com recurso à fotografia digital. Deste modo analisou-se a relação entre todos os parâmetros caracterizadores do comportamento obtido nos ensaios de corte, ou seja, a tensão tangencial de pico e residual, a energia dissipada durante o processo de rotura por corte, o ângulo de atrito, a coesão e a aderência (resistência à tração), com os parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios de fotografia digital para as três superfícies. Relativamente à rugosidade apenas se usou os valores de rugosidade média, R_a e altura máxima do perfil, R_t .

Relativamente ao grau de correlação correlação entre os valores das tensões residuais e de pico obtidas nos ensaios de corte e os parâmetros de rugosidade aqui abordados (rugosidade média e altura máxima do perfil), (ver figuras 104 e 105), obteve-se para o grau de correlação entre as tensões de pico e a rugosidade média um valor de 0.9977 e para entre as tensões residuais e a rugosidade média um valor de 0.9679. Podemos deste modo constatar que foram obtidos graus de correlação elevados, o que demonstra que a rugosidade média e a altura máxima do perfil têm influência direta nos valores de tensões de pico e residuais. Assim,

Ainda, no que diz respeito ao parâmetro de rugosidade altura máxima do perfil, R_t , as correlações entre a tensão de pico e residual e este parâmetro resultaram em valores do grau de correlação de 0.983 e 1, ficando aqui demonstrada a influência direta da rugosidade nas tensões de pico e residual obtidas nos ensaios de corte.

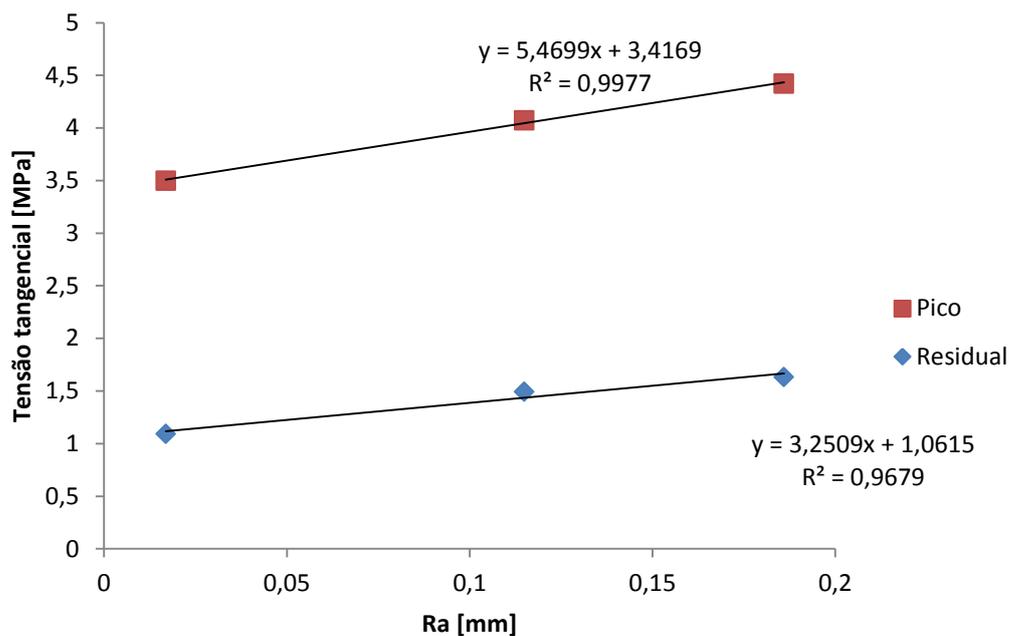


Figura 104 - Tensão de pico e residual vs rugosidade média, R_a .

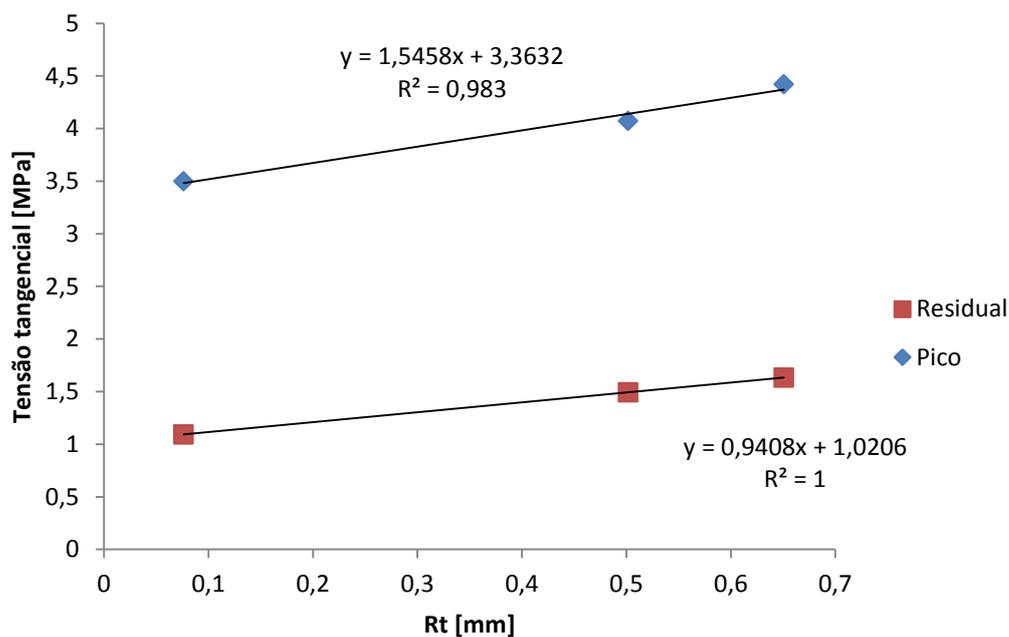


Figura 105 - Tensão de pico e residual vs altura máxima do perfil, R_t .

Relativamente às figuras 106 e 107, e tal como anteriormente quando se utilizou o ensaio de laser, volta a observar-se um grau de correlação inferior que nos casos anteriores. No entanto, e comparativamente com o caso referido no subcapítulo 6.1, regista-se um aumento dos graus de correlação obtidos. Provavelmente, pelo facto de a fotografia digital fornecer a informação

relativa a toda a superfície (3D), produz resultados que se relacionam melhor com os parâmetros em discussão. Em particular, a energia dissipada durante o processo de rotura parece poder ser razoavelmente bem descrito com base nos parâmetros de rugosidade considerados se a superfície for caracterizada por um processo 3D, mas seria necessário realizar mais ensaios para confirmar esta hipótese.

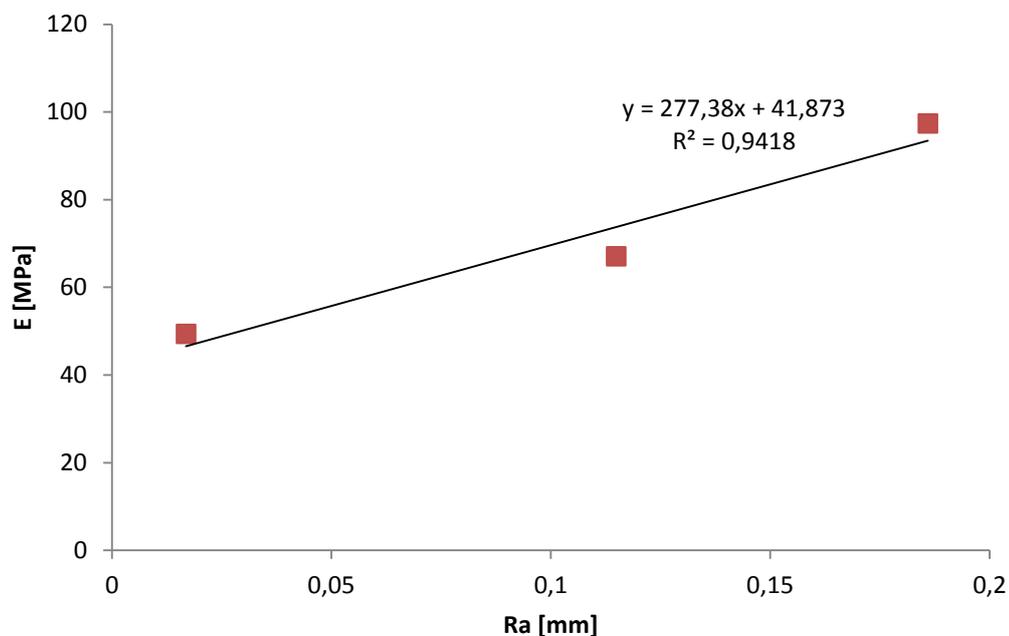


Figura 106 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) (E) vs rugosidade média, R_a .

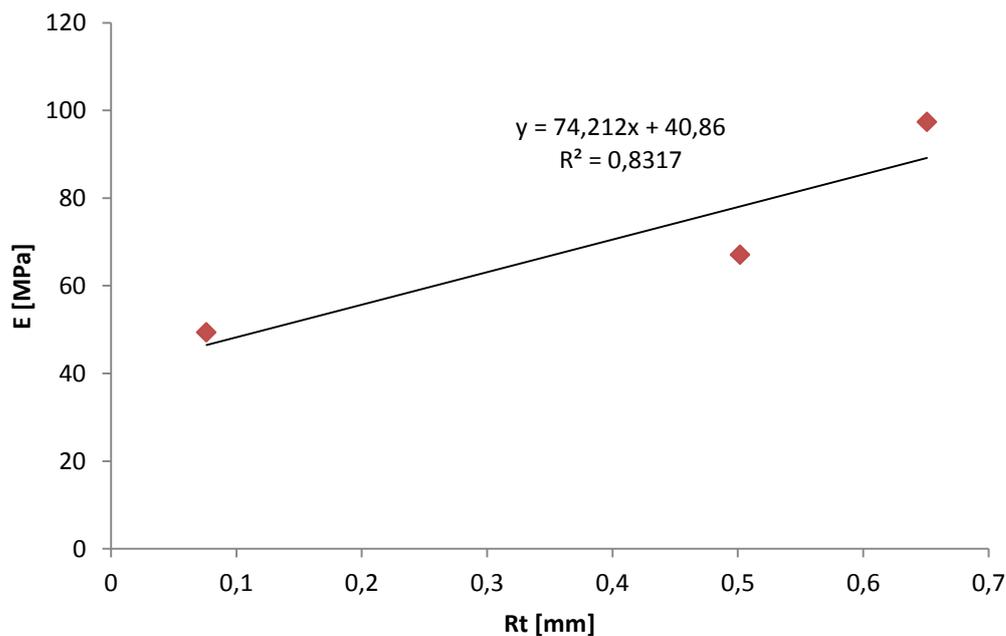


Figura 107 - Energia dissipada no processo de rotura por corte (modo II de propagação de fenda) (E) vs altura máxima do perfil, R_t .

Relativamente aos graus de correlação obtidos entre o ângulo de atrito e os parâmetros de rugosidade R_a e R_t , observando as figuras 108 e 109 verifica-se, tal como anteriormente, que se obtém graus de correlação muito baixos. O grau de correlação entre o ângulo de atrito e a rugosidade média é de 0.1115 e entre o ângulo de atrito e a altura máxima do perfil é de 0.2465. Tal como referido anteriormente, estes resultados podem ser justificados pela menor resistência da matriz em relação ao substrato, obtendo-se uma rotura pela matriz cimentícia e consequentemente a forma da superfície do granito não é relevante.

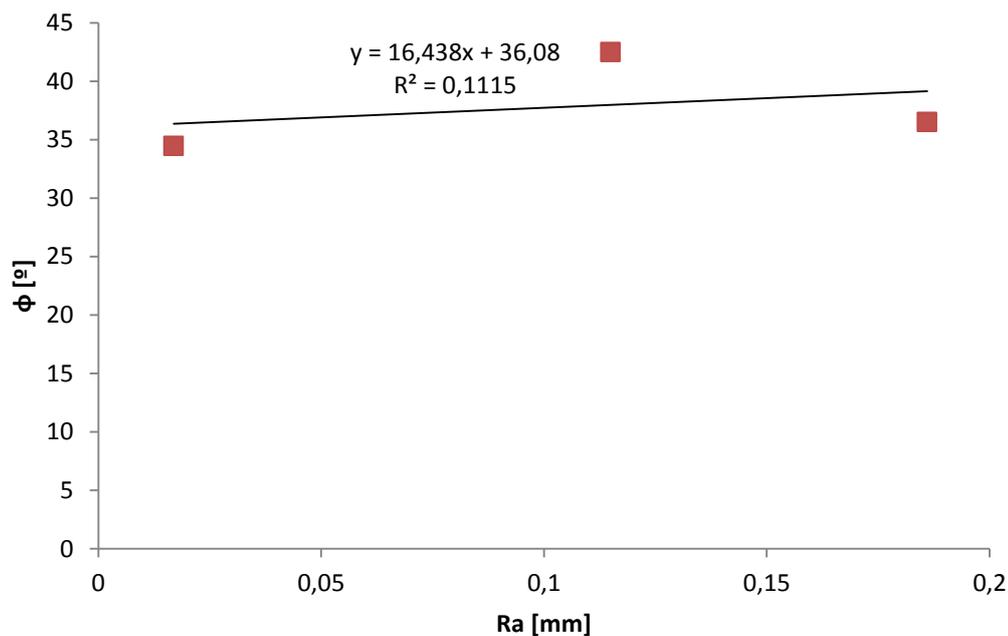


Figura 108 - Ângulo de atrito, ϕ vs rugosidade média, R_a .

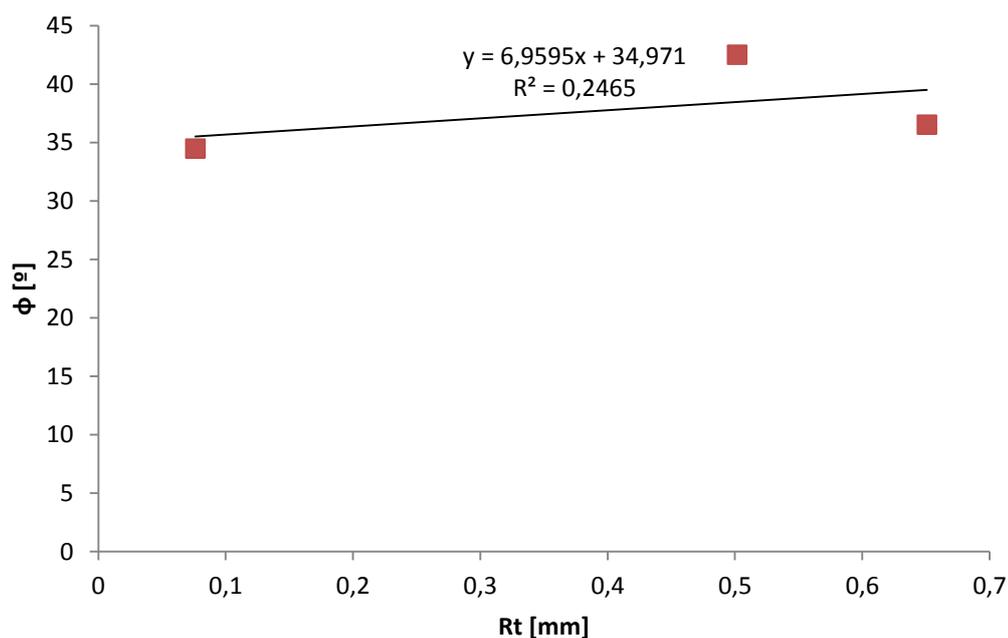


Figura 109 - Ângulo de atrito, ϕ vs altura máxima do perfil, R_t .

Relativamente à relação entre a resistência à tração e os parâmetros da rugosidade (ver figuras 110 e 111), podemos concluir que a rugosidade tem influência direta na aderência do material de reforço ao substrato, uma vez que se obtêm graus de correlação muito elevados. Assim, o valor da correlação entre a resistência à tração e a rugosidade média é de 0.912 e o

da resistência à tração e a altura máxima do perfil é de 0.9852. Aqui, e comparativamente com os ensaios de laser, os valores de correlação diminuíram ligeiramente.

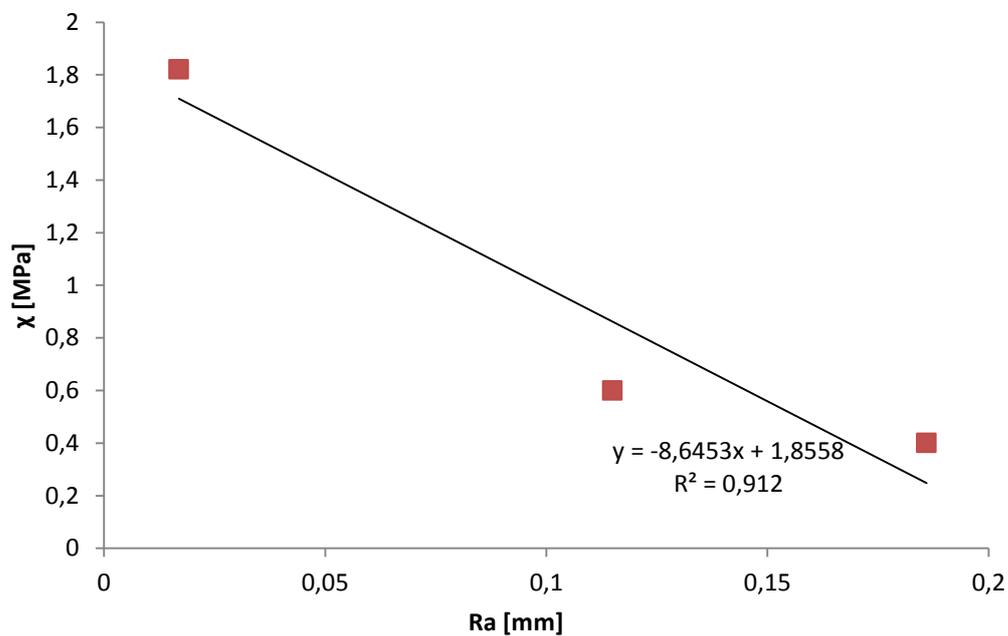


Figura 110 - Resistência à tração, χ vs rugosidade média, R_a .

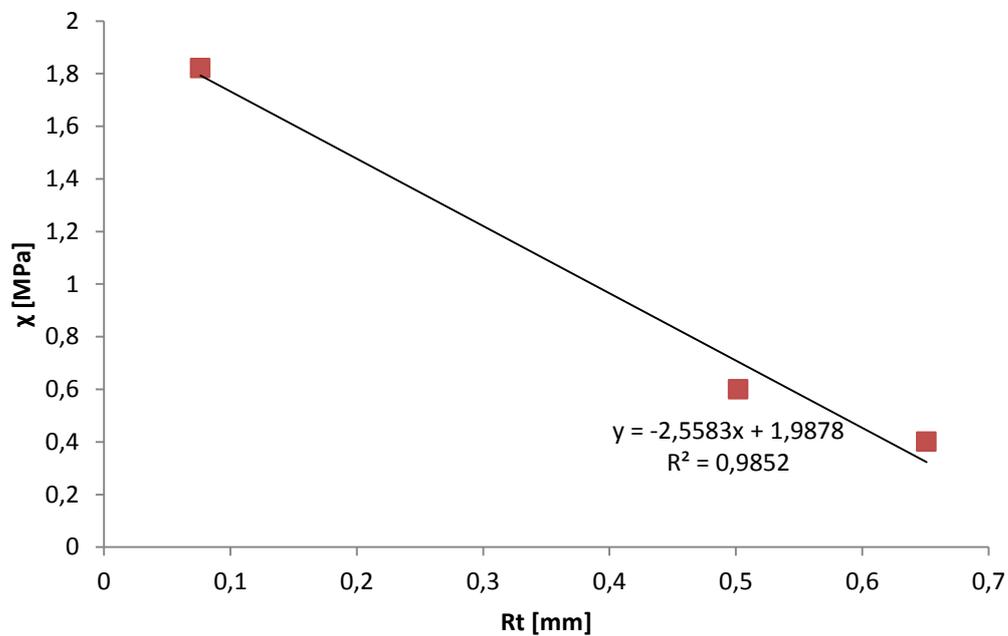


Figura 111 - Resistência à tração, χ vs altura máxima do perfil, R_t .

Quanto à relação entre a coesão e os parâmetros de rugosidade, mais uma vez constata-se que a rugosidade não tem influência direta nos resultados obtidos nos ensaios de corte. Assim, analisando as figuras 112 e 113 podemos observar que a função existente não é linear, não se obtendo assim valores para as correlações próximos de 1. Aqui, para a correlação entre a rugosidade média e a coesão obteve-se um valor de 0.5965 e para a correlação entre a coesão e a altura máxima do perfil obteve-se um valor de 0.7624.

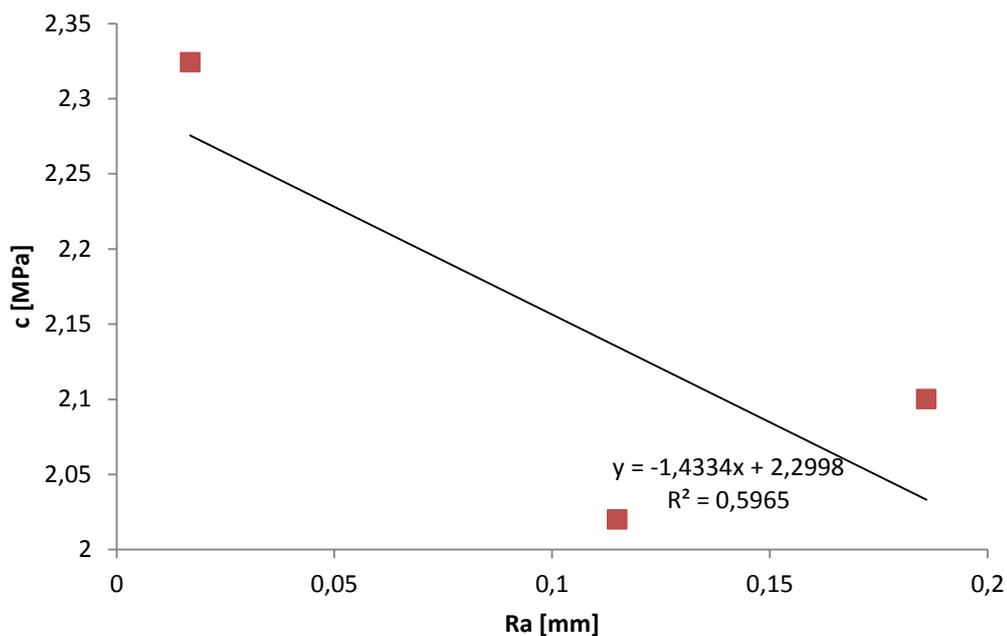
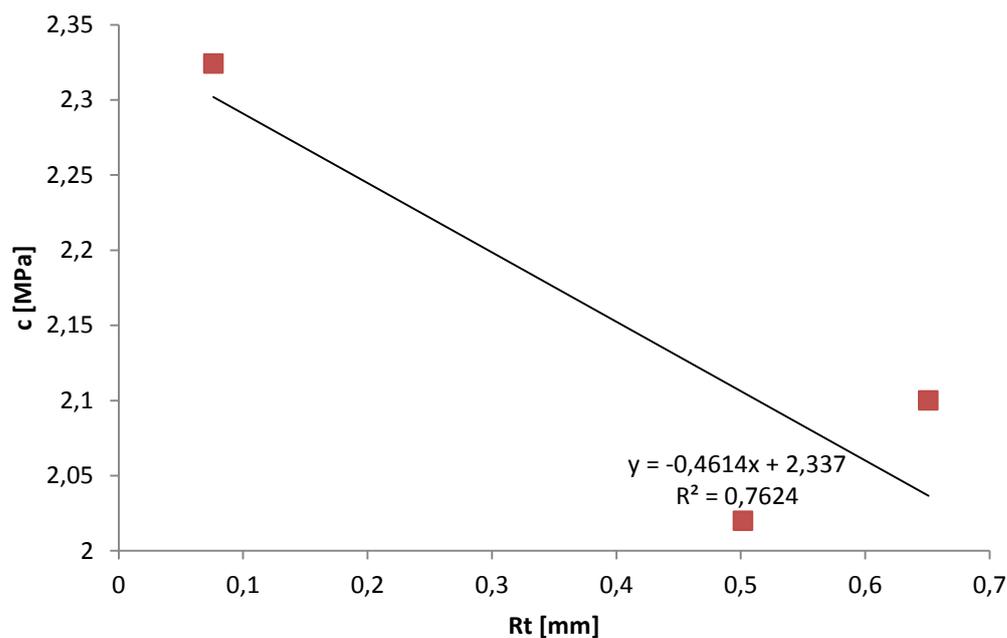


Figura 112 - Coesão, c, vs rugosidade média, R_a .

Figura 113 - Coesão, c vs altura máxima do perfil, R_t

6.3 Ensaio laser vs ensaio fotografia digital

Neste ponto importa comparar o grau de correlação obtido considerando cada uma das técnicas de análise da rugosidade das superfícies a que se referem os subcapítulos 6.1 e 6.2. Assim, na tabela 32 comparam-se os valores do grau de correlação obtidos para ambas as técnicas usadas:

Tabela 32 - Graus de correlação obtidos entre os parâmetros de rugosidade e as características mecânicas dos ensaios de corte, considerando ambas as técnicas de caracterização da rugosidade.

	Laser		Fotografia digital	
	R_a	R_t	R_a	R_t
τ_p	0.9783	0.9555	0.9977	0.983
τ_r	0.9997	0.9935	0.9679	1
A	0.8188	0.7664	0.9418	0.8317
ϕ	0.2613	0.3201	0.1115	0.2465
χ	0.989	0.9984	0.912	0.9852
c	0.7767	0.8282	0.5965	0.7424

Considerando que a qualidade de uma regressão linear efetuada para um conjunto de dados pode ser avaliada pelo coeficiente de correlação, R^2 , este índice afere o grau de relacionamento entre as várias variáveis. Deste modo, a valores mais elevados e mais próximos de 1 corresponde um grau de correlação entre valores perfeito.

Numa primeira análise podemos concluir que a rugosidade da superfície de granito tem influência direta nos valores obtidos de tensões tangenciais de pico e residual, sendo que os graus de correlação obtidos estão muito próximos de 1. É ainda possível concluir que, no que se refere à resistência à tracção, esta parece estar directamente relacionada com a rugosidade da superfície de granito.

Outro ponto fundamental nesta investigação prende-se com a energia dissipada durante o processo de rotura por corte da interface. Observando os gráficos dos subcapítulos 6.1 e 6.2, referentes a este parâmetro, permite-nos observar que o seu comportamento não é linear e tende a ter uma abordagem mais polinomial. Aqui pode concluir-se que também o tratamento dado à superfície possa ter influência nos ensaios de corte.

No que se refere ao ângulo de atrito, constata-se que o grau de correlação é em geral muito baixo. É portanto possível considerar que a existência de uma relação entre este e a rugosidade é improvável, esperando-se assim que a rotura se registre pela matriz cimentícia, uma vez que esta é menos resistente que o granito.

Por último, é possível verificar que ambas as técnicas de caracterização das superfícies estudadas resultam em graus de correlação semelhantes, sendo portanto indiferente qual o método usado para a medição da rugosidade, podendo considerar-se que ambos os métodos são eficazes e válidos para esta análise.

7 Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões sobre o trabalho realizado, pretendendo-se resumir os aspetos principais e os resultados obtidos acerca do comportamento do material de reforço, do comportamento da interface entre substrato de granito e o material de reforço e acerca da análise de rugosidade do substrato. Analisa-se ainda, resumidamente, a influência da rugosidade no comportamento da interface.

Adicionalmente, apresentam-se as principais sugestões relativamente ao trabalho que se pensa ser pertinente desenvolver no futuro, no âmbito deste estudo.

7.1 Conclusões

O reforço estrutural de estruturas de alvenaria assume especial relevo visto que este tipo de estruturas surge com frequência e numa grande percentagem do parque habitacional de Portugal.

Devido à sua longevidade e falta de manutenção, muitas estruturas de alvenaria têm necessidade de reforço, pois sofrem de diversas patologias como fissurações, problemas associados à humidade, problemas térmicos e acústicos, deterioração de revestimentos e acabamentos. Também este tipo de estruturas tem tendência a ter um deficiente comportamento a ações sísmicas, não cumprindo por isso com os requisitos das mais atuais normas de dimensionamento estrutural.

Tendo em conta estes problemas, há uma necessidade de reforço das alvenarias. Assim, existem diversas técnicas que permitem isso mesmo, sendo umas mais eficientes que outras. No âmbito deste trabalho, abordou-se o uso de técnicas com recurso a matrizes cimentícias, sendo que dentro destas nos focamos no sistema desenvolvido pela S&P, o ARMO-crete.

Após o enquadramento do tema em estudo pela pesquisa bibliográfica, houve a necessidade de analisar com mais detalhe o material de reforço abordado, assim como analisar a interface entre este e o substrato, de caracterizar a rugosidade da superfície do granito e por último de determinar a influência da rugosidade no comportamento da interface.

A superfície proposta para análise, constituída por granito, aparece em aplicações reais com vários tipos de formas, dependendo do tratamento de superfície a que é sujeito. Assim sendo,

e de forma a tornar esta investigação o mais abrangente possível, optou-se por caracterizar três tipos de superfícies diferentes, de forma a obter uma visão mais global do comportamento da interface. Deste modo foram analisadas uma superfície serrada, uma superfície com tratamento em jato de areia e uma superfície bujardada

No capítulo 3, realizou-se o estudo das propriedades mecânicas do ARMO-crete de forma a apoiar a descrição do comportamento mecânico da interface por intermédio de expressões que permitem prever a rotura da interface para estados de tensão multi-axiais ou critérios de rotura, realizamos nos capítulos subsequentes. Também, realizaram-se os diversos ensaios para se poder comparar os valores obtidos através dos ensaios experimentais com os fornecidos pela empresa fabricante do ARMO-crete.

De forma a caracterizar mecanicamente o material de reforço realizaram-se três tipos de ensaios: flexão, compressão e aderência (pull-off).

Relativamente aos ensaios de aderência, este realizou-se para as três superfícies abordadas nesta investigação, a serrada, a jato de areia e a bujardada, para as quais se obteve uma resistência à tracção de 0.29, 0.36, 0.17 MPa respectivamente. Atendendo a estes resultados, podemos desde já concluir a sua não coerência, pois na superfície intermédia obtemos um valor de resistência à tração mais elevado. No entanto, isto pode ser justificado pelo tratamento dado à superfície bujardada, que dada a sua intensidade mecânica poderá enfraquecer o substrato.

No quarto capítulo realizou-se o estudo do comportamento mecânico da interface entre o substrato e o material de reforço. Aqui, o estudo experimental revelou um comportamento mecânico que é habitual para o tipo de materiais estudados. De forma a caracterizar o comportamento da interface, de entre os critérios de cedência clássicos que existem para caracterizar a rotura para estados de tensão multi-axiais optou-se por um critério de cedência aplicável a materiais frágeis. Analisando os diversos critérios, verificou-se que o critério de Mohr apresentava resultados muito ajustados.

Com base nas respostas obtidas nos vários ensaios realizados para os três tipos de superfície, calcularam-se os valores das tensões de pico e residuais para todos os provetes ensaiados, para posteriormente se efectuar uma aproximação otimizada da curva de Mohr a aos resultados experientais. Assim, para efectuar esta aproximação, foi usado o curve fitting do Matlab com

o qual se otimizou o valor dos três parâmetros que definem o critério de cedência de Mohr, ou seja, os parâmetros de coesão, ângulo de atrito, resistência à tração. Obteve-se ainda, para cada caso, o grau de correlação entre a curva de Mohr e os resultados experimentais.

Relativamente à aproximação da curva de Mohr aos resultados experimentais considerando as tensões de pico, correlação obtiveram-se boas correlações para as superfícies jato de areia e bujardada, com valores de 0.9195 e 0.9501 respetivamente. No entanto, para a superfície serrada obteve-se um valor ligeiramente inferior, 0.7957, o que resultou de uma maior dispersão dos resultados obtidos, resultado de um processo de rotura mais frágil.

Por outro lado, relativamente à aproximação da curva de Mohr aos resultados experimentais considerando as tensões residuais, neste caso obtiveram-se graus de correlação superiores, com valores de 0.997, 0.9866, 0.9843 respetivamente para a superfície serrada, jato de areia e bujardada. Tendo em conta os resultados, pode-se concluir que o critério de Mohr se ajusta perfeitamente ao mecanismo de rotura em análise.

Foi também possível verificar que o comportamento da interface no caso da superfície serrada quando sujeita a esforços de corte é sobretudo determinado pela aderência entre os materiais, enquanto que no caso da superfície bujardada é também condicionado pela desagregação da matriz de reforço. A superfície tratada com jato de areia tem um comportamento intermédio relativamente às duas superfícies anteriores.

No capítulo 5 procedeu-se à análise da forma e dos parâmetros de rugosidade das superfícies de granito estudadas. Primeiramente, existiu a necessidade de analisar as técnicas existentes e os principais parâmetros envolvidos no estudo da rugosidade de superfícies do tipo das que foram estudadas. Assim, tendo em conta este estudo e os equipamentos disponíveis, optou-se pela utilização de um sensor laser e pelo desenvolvimento de uma metodologia baseada em fotografia digital. O primeiro método é mais expedito, prático e rápido, no entanto não permite obter valores de rugosidade para toda a superfície de forma integrada. Já o segundo método permite a construção do modelo tridimensional de toda a superfície, e deste modo permite a determinação dos parâmetros de rugosidade com base em informação relativa a toda a superfície em estudo.

Considerando ambos os métodos e os parâmetros usados para esta análise (rugosidade média, altura máxima do pico e vale, altura máxima do perfil e desvio quadrático médio), obtivemos os seguintes valores médios para cada um destes:

Tabela 33 - Sumário dos resultados da análise da rugosidade.

Parâmetro	Simb.	Ensaio Laser			Ensaio Fotografia Digital		
		Serrada	Jato de Areia	Bujardada	Serrada	Jato de Areia	Bujardada
Rugosidade média	R_a	0.021056	0.150128	0.191653	0.016883	0.11493	0.185976
Desvio quadrático médio	R_q	0.000377	0.002415	0.003226	0.000798	0.004662	0.007465
Máximo valor dos vales	R_v	0.09274	0.395495	0.54076	0.044465	0.32367	0.81972
Máximo valor dos picos	R_p	0.110497	0.448145	0.522795	0.076153	0.501792	0.650804
Altura máxima do perfil	R_t	0.203238	0.843642	1.06355	0.12062	0.825461	1.47052

Analisando os valores presentes na tabela 33, podemos concluir que ambos os métodos são representativos, apesar das ligeiras diferenças. Essas diferenças podem resultar de diversos fatores como a não perpendicularidade dos provetes em relação aos mecanismos de ensaio e dificuldade em garantir um posicionamento exato dos perfis comparados, uma vez que o sensor de laser utiliza um feixe com uma largura de 1.0 mm, um valor bastante elevado considerando a escala de valores de rugosidade em questão. No entanto, em geral verifica-se que ambos os métodos de análise conduzem a resultados bastante coerentes.

No capítulo 6 analisou-se, com base nos resultados obtidos nos capítulos anteriores, a influência da rugosidade no comportamento mecânico da interface. Aqui, recorreu-se à comparação dos parâmetros obtidos através da aproximação da curva de Mohr (coesão,

ângulo de atrito, energia dissipada, resistência à tração e tensões residuais e de pico) com dois parâmetros de rugosidade (rugosidade média e altura máxima do perfil).

Através dos resultados obtidos para ambos os métodos de medição da rugosidade conclui-se que, em geral, a rugosidade influencia o comportamento mecânico da interface, uma vez que quase todos os parâmetros apresentaram elevados graus de correlação, à exceção da energia dissipada e do ângulo de atrito. Este comportamento poderá indicar que não só a rugosidade tem influência no comportamento da interface, mas também o tratamento dado à superfície e o seu efeito mecânico na sua integridade. Em particular, o método de tratamento da superfície poderá introduzir um dano inicial que altera o comportamento mecânico da interface.

7.2 Trabalhos futuros

Este trabalho surgiu na continuidade de alguns trabalhos já desenvolvidos neste âmbito. Do mesmo modo, torna-se pertinente agrupar um conjunto de ideias úteis de melhoramento e evolução. Adicionalmente, considerando a discussão dos resultados realizada e as conclusões obtidas, seria útil esclarecer algumas das questões que, dadas as limitações de tempo, não foi possível aprofundar. Assim propõe-se:

- Realizar ensaios experimentais adicionais com os mesmos materiais usados nesta dissertação de forma a otimizar e se obter melhor conhecimento da influência das características da interface no seu comportamento mecânico;
- Alargar o tipo de ensaios de caracterização e análises realizadas sobre a influência da interface a outros tipos de substrato e materiais de reforço;
- Realizar ensaios de caracterização da superfície do substrato e dos parâmetros de rugosidade com recurso a técnicas alternativas, de forma a corroborar os resultados obtidos neste estudo;
- Realizar estudos adicionais que permitam subtrair o efeito óptico da lente nos ensaios realizados fotografia digital para escalas menores.
- Apresentar as regressões com base nos resultados obtidos em todos os provetes;
- Caracterizar a iniciação e propagação da fenda de corte durante os ensaios, por forma a permitir um conhecimento detalhado do processo de rotura por corte da interface e apoiar a modelação numérica deste mecanismo.

Bibliografia

1. **Sousa, Hipólito de.** *Construções em Alvenaria.* s.l. : FEUP, 2003.
2. **INE, LNEC.** *O parque habitacional e a sua reabilitação, análise e evolução.* s.l. : INE, LNEC, 2013.
3. **Almeida, João.** *High ductility strengthening systems for masonry structural rehabilitation.* University of Minho. s.l. : Phd thesis plan, Universidade do Minho, 2014. Plan of Phd Thesis.
4. **Adelaide Gonçalves, Jorge Brito, Fernando Branco.** *Causas de anomalias em paredes de alvenaria de edifícios recentes.*
5. **Paulo B. Lourenço, Nuno Mendes.** *Avaliação da segurança sísmica de edifícios antigos.* Guimarães : Universidade do Minho.
6. **Humberto Varum, Hugo Rodrigues, Romeu Vicente, Aníbal Costa.** *A influência das paredes de enchimento na resposta sísmica de estruturas de edifícios.*
7. **Azevedo, Hélder Daniel de Sousa.** *Reforço de estruturas de alvenaria de pedra, taipa e adobe com elementos de madeira maciça.* s.l. : Tese de Mestrado, FEUP, 2010.
8. **Bordigoni, Davide.** *Assessment of the brick-strengthening mortar interface: experimental research and numerical modelling.* Università Degli Studi di Ferrara : Master Thesis, 2014. Master thesis.
9. **João Roque, Paulo Lourenço.** *Técnicas de intervenção estrutural em paredes antigas de alvenaria.*
10. **APICER, CTCV.** *Manual de alvenaria de tijolo.*
11. **American Concrete Institute.** *Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repairs and strengthening concrete and masonry structures.* s.l. : American Concrete Institute.
12. **Azevedo, Álvaro F. M.** *Método dos elementos finitos.* s.l. : FEUP, 2003.

13. *Zero-thickness interface model formulation for failure behavior of fiber-reinforced cementitious composites*. **Antonio Caggiano, Guillermo Etse, Enzo Martinelli**. Computers and Structures, 2012, Elsevier, pp. 23-32.
14. **R. M. Natal Jorge, L. M. J. S. Dinis**. *Teoria da plasticidade*. s.l. : FEUP, 2004/2005.
15. *Phenomenological yield and failure criteria*. **Holm Altenbach, Alexandre Bolchoun, Vladimir A. Kolupaev**. Plasticity of pressure - sensitive materials, Engineering materials, 2014, Springer.
16. **Akhtar S. Khan, Sujian Huang**. *Continuum theory of plasticity*. s.l. : A wiley-Interscience publication, 1995.
17. **Sika**. *Sikadur 32, ficha de produto*. 2011.
18. **Vasconcelos, Graça**. *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry*. s.l. : Phd thesis, Universidade do Minho, 2005.
19. **Pluijm, Rob van der**. *Out-of-plane bending of masonry behaviour and strength*. s.l. : Technische Universiteit Eindhoven, 1999.
20. **Miguel, Angela**. *Correlação entre a rugosidade e o ângulo de atrito em superfícies de descontinuidade abertas*. s.l. : Tese de mestrado, IST, 2011. Dissertação de mestrado.
21. **Grasselli, Giovanni**. *Shear strength of rock joints based on quantified surface description*. s.l. : Phd thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2001. Grade de Docteur.
22. *A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces*. **Pedro M.D. Santos, Eduardo N.B.S. Júlio**. 2013, Construction and Building Materials, pp. 912-923.
23. *3D surface profile equipment for the characterization of the pavement texture - TexScan*. **João L. vilaça, Jaime C. Fonseca, A.C.M. Pinho, Elisabete Freitas**. 2010, Mechatronics, pp. 674-685.
24. *Roughness parameters*. **E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman**. 2002, Journal of Materials processing technology, pp. 133-145.

25. **Poropat, G.V.** *Measurement of surface roughness of rock discontinuities*. 2009.
26. MeshLab. [Online] sourceforce.net. <http://meshlab.sourceforge.net/>.
27. **Pereira, Diogo.** *Estudo sísmico de edifícios antigos*. s.l. : Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Anexos

Anexo I – Caracterização dos provetes de ARMO-crete

Tabela 34 - Características provetes para caracterização do ARMO-crete

Provete		Tempo [dias]	c [mm]	l [mm]	h [mm]	Peso [g]
A	1	28	160,27	42,32	40,35	554
	2		160,2	42,52	40,2	551
	3		160,73	42,16	39,66	572
	4		160,85	39,85	39,7	536
	5		159,82	40,86	40,16	556
	6		160	40,72	40,31	556
B	1	28	160,25	39,63	39,73	541,8
	2		160,28	40,06	40,03	561,5
	3		160,21	40,29	41,11	568,1
C	1	28	161,17	40,91	40,46	563,1
	2		160,48	40,78	40,33	561
	3		160,86	40,96	39,81	558,1
D	1	28	160,63	39,11	38,85	550,9
	2		159,48	39,13	38,89	554,1
	3		159,52	39,55	39,09	560,4
E	1	28	159,06	39,73	40,15	540,6
	2		159,96	40,4	39,73	555,9
	3		160	40,1	39,44	553,3

Anexo 1I – Algoritmo “trust-region”, “curve fitting” Matlab

- Superfície serrada

Tabela 35 - Iterações obtidas para superfície serrada

χ	c	φ	R^2
0.29	1.599	0.756	0.644
0.55	2.03798	0.978	0.752
0.85	2.262	18.335	0.783
1	2.27	25.994	0.787
1.5	2.292	33.104	0.7941
1.82	2.323	34.45	0.7957
1.85	2.326	34.54	0.7955

- Superfície jato de areia

Tabela 36 - Iterações obtidas para a superfície jato de areia

χ	c	φ	R^2
0.36	1.93	36.51	0.8725
0.4	1.9474	38.34	0.8788
0.5	1.986	41.04	0.893
0.55	2	41.87	0.909
0.6	2.02	42.50	0.9195
0.65	2.04	43	0.9188

- Superfície Bujardada

Tabela 37 - Iterações obtidas para a superfície bujardada

χ	c	ϕ	R^2
0.17	1.73	1.28	0.9355
0.2	1.86	1.31	0.9375
0.3	2.11	21.87	0.9458
0.35	2.099	32.19	0.9483
0.4	2.1	36.51	0.9501
0.45	2.08	38.97	0.9474