



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

**Estruturas em cantaria de pedra de granito de  
alta resistência  
Comportamento de juntas entre blocos**

**Miguel Ferreira Clemente**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João António Saraiva Pires da Fonseca

**Covilhã, Outubro de 2012**



# Dedicatória

Dedico esta dissertação à minha família por todo o apoio dado em todos os instantes e em especial aos meus pais, pelas condições que com todo o seu esforço me proporcionaram para que pudesse da melhor forma concluir esta etapa. Aos meus amigos que sempre me apoiaram incondicionalmente nesta fase da minha vida.



# Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Doutor João Pires da Fonseca a oportunidade de poder realizar esta dissertação e por todas as suas sugestões, ensinamentos e conselhos que foram fundamentais para a elaboração desta dissertação e que certamente irão ser muito úteis na vida profissional.

Desejo ainda prestar o meu agradecimento ao Eng.º Clemente Pinto por disponibilizar parte do seu precioso tempo no acompanhamento e na realização dos trabalhos laboratoriais, pelos ensinamentos transmitidos sobre o software de cálculo com elementos finitos e por todos os conhecimentos transmitidos sobre o granito.

Agradeço ao Sr. Albino pela grande ajuda prestada no laboratório de estruturas na montagem do equipamento em todos os ensaios que sem a sua ajuda, teriam sido muito mais difíceis.

Transmito também o meu agradecimento ao Prof. Paulo Fiadeiro do Centro de Óptica da Universidade da Beira Interior (UBI) pela disponibilidade para esclarecer as minhas questões acerca dos métodos de medição da rugosidade de superfícies.

Deixo os meus agradecimentos à empresa Granigua por todo o empenho demonstrado na entrega dos provetes nas melhores condições dentro das suas disponibilidades e capacidades.

Finalmente e não menos importantes, muito obrigado a todos aqueles que me acompanharam nesta caminhada, especialmente aos meus amigos e família por todo o apoio e ajuda prestada.



# Resumo

O objectivo desta dissertação é determinar de que modo as juntas entre blocos influenciam o comportamento de estruturas de cantaria de granito de alta resistência. A resistência deste tipo de estruturas é afectada pela qualidade de execução das superfícies dos blocos que as constituem, em termos de rugosidade e imperfeições. A superfície dos blocos é normalmente obtida através de corte com disco ou fio diamantado que produzem diferentes qualidades de acabamento da superfície. Para avaliar como o processo de corte afecta a resistência do conjunto foram realizados ensaios de compressão axial em vários provetes agrupados de acordo com o processo de corte. Verificou-se que quando as juntas são bem executadas ou seja, com defeitos dentro de determinados limites de tolerância, a resistência à compressão do conjunto não é afectada pelas juntas entre blocos. Caso contrário a resistência diminui até valores que podem chegar aos 60% da tensão de rotura de provetes sem juntas, dependendo da relevância do defeito. Conclui-se que a rugosidade da superfície torna-se secundária relativamente às imperfeições e não tem influência relevante na rotura.

Foram também realizadas modelações numéricas do granito com e sem juntas com o objectivo de melhor interpretar o comportamento quando solicitado por forças de compressão. Estudou-se de forma simplificada a influência da dimensão do grão, da disposição relativa dos minerais e do processo de corte. Concluiu-se que as tracções e primeiras fissuras surgem no Feldspato e que tendem a crescer até um valor máximo quando a proporção entre os volumes da matriz e do grão é de cerca de 60 e 40% respectivamente. Quando os minerais estão alinhados segundo uma direcção preferencial existem condições para o surgimento de uma fissura na matriz segundo a direcção do carregamento. Quando desalinhados as tracções tornam a surgir em primeiro lugar dentro do Feldspato e segundo a direcção do carregamento, independentemente do material da matriz, tal como observado por vários autores [1]. No caso das juntas executadas com disco diamantado ocorrem tracções da mesma ordem de grandeza das registadas em provetes sem junta. Em juntas de fio diamantado ocorrem também tracções nos grãos de Quartzo, mas de ordem de grandeza muito superior à dos valores obtidos com disco diamantado.

## Palavras-chave

Granito de alta resistência, compressão, juntas, imperfeições.



# Abstract

The main objective of this thesis is to determine how the joints between blocks influence the behavior of high strength granite ashlar structures. The strength of such structures is affected by the quality execution of the surfaces of the blocks that constitute, in terms of roughness and imperfections. The blocks surfaces is usually obtained by cutting disc or diamond wire which produce different qualities of surface finish. To evaluate how the cutting process affects joint strength, axial compression tests were performed on several samples grouped according to the cutting process. It was found that when the joints are well executed or having defects within a certain tolerance limit, the compressive strength of the set is not affected by the joints between blocks. Otherwise the resistance decreases to values which can reach 60% of the compressive strength of test samples without joints, depending on the defect's relevance. It is concluded that the surface roughness becomes secondary relatively to the imperfections and has no relevant influence on rupture.

Numerical modeling was also performed considering granite with and without joints in order to better interpret the behavior when requested by compressive forces. It was studied in a simplified way the influence of the grain size, the provision of minerals and cutting process. It was concluded that the tractions and first cracks appears inside the Feldspar and they tend to develop to a maximum value when the ratio between the volumes matrix and grain is about 60% and 40% respectively. When minerals are aligned in a preferential direction, conditions arise for the emergence of a crack in the matrix aligned with the loading direction. When minerals become misaligned, traction appears first inside Feldspar and aligned with loading direction, independently of the matrix material, as noted by several authors [1]. In case of joints executed with diamond disc, tractions occur in the same order of magnitude as in samples without joints. In diamond wire joints tractions also occur in Quartz grains, but the order of magnitude is much higher than the values obtained with diamond disc.

## Keywords

High strength granite, compression, joints, imperfections.



# Índice

1	Introdução	1
1.1.	Contexto histórico	1
1.2.	Investigação recente em estruturas de pedra	4
2	Objectivos	7
2.1.	Observação	7
2.2.	Formulação do problema	7
2.3.	Questões Prévias	8
3	Metodologia	9
3.1.	Visitas de estudo e Inquéritos	9
3.2.	Ensaio experimental em laboratório	10
3.3.	Quantificação da rugosidade	11
3.3.1.	Métodos de quantificação da rugosidade	12
3.4.	Modelação numérica	13
4	O Granito	15
4.1.	Mineralogia, Textura e Propriedades Mecânicas dos Minerais	15
4.1.1.	Mineralogia	15
4.1.2.	Hábito e Forma	18
4.1.3.	Textura das rochas eruptivas	19
4.1.4.	Propriedades mecânicas dos minerais	21
4.2.	Comportamento mecânico do granito	22
4.3.	Tecnologias de corte	25
4.3.1.	Extracção	25
4.3.2.	Preparação do bloco	27
4.3.2.1.	Mecanismo de corte e desgaste	30
4.3.3.	Acabamento final	32
4.4.	Parâmetros caracterizadores da rugosidade	34
5	Análise Numérica	41
5.1.	Programa de cálculo automático	41
5.2.	Modelação	42
5.2.1.	Modelos preliminares	42
5.2.2.	Modelos definitivos	44
5.3.	Resultados	45
5.3.1.	Influência da dimensão do grão	45
5.3.1.1.	Modelo M3A	45
5.3.1.2.	Modelo M3B	47
5.3.1.3.	Modelo M3C	49

5.3.2.	Influência da distribuição espacial dos minerais	51
5.3.2.1.	Modelo M4	51
5.3.2.2.	Modelo M5	53
5.3.2.3.	Modelo M6	55
5.3.2.4.	Modelo M7	57
5.3.3.	Influência da forma da junta	60
5.3.3.1.	Modelo MFD	60
5.3.3.2.	Modelo MFD	63
6	Análise Experimental	67
6.1.	Introdução	67
6.2.	Preparação do ensaio	69
6.3.	Equipamento utilizado	72
6.4.	Procedimento experimental	74
6.5.	Descrição dos Ensaio	75
6.5.1.	Determinação do Módulo de Elasticidade (E)	75
6.5.2.	Provetes sem juntas	76
6.5.2.1.	Provete 5	76
6.5.2.2.	Provete 3	77
6.5.2.3.	Provete 2	79
6.5.2.4.	Provete 6	81
6.5.2.5.	Provete 4	83
6.5.2.6.	Provete 1	84
6.5.2.7.	Provete 15	86
6.5.2.8.	Provete 16	87
6.5.3.	Provetes com juntas	89
6.5.3.1.	Provete 12	90
6.5.3.2.	Provete 9	92
6.5.3.3.	Provete 7	93
6.5.3.4.	Provete 8	95
6.5.3.5.	Provete 10	97
6.5.3.6.	Provete 11	99
6.5.3.7.	Provete 13	101
6.5.3.8.	Provete 14	103
6.6.	Discussão dos resultados obtidos	105
7	Análise de resultados	109
7.1.	Determinação dos parâmetros estatísticos	109
7.1.1.	Provetes sem juntas	109
7.1.2.	Provetes com juntas	110
7.1.3.	Análise por defeito	111
7.1.3.1.	Falta de Ortogonalidade	112

7.1.3.2.	Superfície de encosto com curvatura	112
7.1.3.3.	Cintagem devido à rigidez transversal das chapas	113
7.2.	Proposta de método de cálculo da tensão de dimensionamento ( $f_{gd}$ )	115
8	Conclusões	117
9	Bibliografia	119
9.1.	Publicações científicas	119
9.2.	Internet	121



# Lista de Figuras

Figura 1 - Museu Hagia Sophia, Istambul (Turquia) [b]	1
Figura 2 - Aqueduto de Los Milagros, Mérida (Espanha) [a]	2
Figura 3 - Ponte Ferroviária de Constância/Praia do Ribatejo [f]	2
Figura 4 - a) Forças que actuam nos arcos; b) Rotura por corte; c) Prevenção da rotura (adaptado de [2])	3
Figura 5 - Contrafortes da Abadia de Westminster	4
Figura 6 - Rotura sobre compressão, típica de paredes de túneis em rocha [6]	5
Figura 7 - Limite empírico para os danos em rocha moderadamente fracturada [9]	6
Figura 8 - Diagrama tensão-extensão típico do granito de Alta resistência [4]	8
Figura 9 - Perfil transversal tipo da junta ( $\Delta$ = tolerância)	10
Figura 10 - Problemas de encurvadura devidos a defeitos	11
Figura 11 - Irregularidades de superfícies: E - Erro de forma; O - ondulação; R - rugosidade; D - defeitos [12]	12
Figura 12 - Métodos de quantificação da rugosidade [13]	13
Figura 13 - Séries de Bowen (adaptado de [d])	16
Figura 14- Textura fanerítica [c]	21
Figura 15 - Textura equigranular e textura porfiróide, respectivamente [c]	21
Figura 16 - Representação esquemática do processo de carga e descarga [24]	21
Figura 17 - Comparação entre escala de dureza de Mohs e escala de microdureza de Vickers [26]	22
Figura 18 - Coesão transversal: a) Representação dos grãos no corte X-Y; b) Tensões nos grãos em equilíbrio [6]	23
Figura 19 - a) Diagrama tensão extensão típico; b) Desenvolvimento da fissuração; c) Deformação em tensão constante no tempo [6]	23
Figura 20 - Fases de rotura do granito	24
Figura 21 - a) Imagem SEM de fissura no interior do Feldspato; b) fronteira Quartzo - Feldspato [1]	25
Figura 22 - Técnicas utilizadas na extracção de rocha em Portugal (dados de 2001) [30]	26
Figura 23 - Esquema de funcionamento da técnica de fio diamantado [31]	26
Figura 24 - Tear multi-lâminas (adaptado de [28])	28
Figura 25 - Gralha esférica e angulosa [28]	28
Figura 26 - Talha - blocos monodisco (adaptado de [28])	29
Figura 27 - Fio diamantado de mola [29]	29
Figura 28 - Modelo físico do processo de corte [32]	30
Figura 29 - Tipos de abrasão [29]	31
Figura 30 - Polidora de tapete transportador [28]	34

Figura 31 - Caracterização da rugosidade: L - comprimento de avaliação, P - Perfil; M - linha média; Ln - comprimento da amostra; Lt - comprimento total	35
Figura 32 - Definição de rugosidade média (Ra) [35]	35
Figura 33 - Representação do parâmetro dos 10 pontos [35]	36
Figura 34 - Definição dos parâmetros Rp, Rpm, Rv, Rvm, Rt [35]	36
Figura 35 - Definição de obliquidade [35]	37
Figura 36 - Parâmetro ADF [35]	38
Figura 37 - Definição de S [35]	38
Figura 38 - Definição de Sm [35]	39
Figura 39 - Definição de n(0) [35]	39
Figura 40 - Descrição do tipo de elemento	41
Figura 41 - Modelos preliminares	42
Figura 42 - Primeiro modelo de cálculo (M1)	43
Figura 43 - Tensões $\sigma_x$ ao longo da metade superior da secção A-A' (ver Figura 42) (Matriz de Quartzo)	43
Figura 44 - Segundo modelo de cálculo (M2) - a) malha de elementos finitos; b) disposição relativa dos minerais	44
Figura 45 - Tensões $\sigma_x$ ao longo da metade superior da secção B-B' (ver Figura 44) (Matriz de Quartzo)	44
Figura 46 - Modelo de cálculo (M3A) e disposição dos minerais	45
Figura 47 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M3A - Matriz de Quartzo)	45
Figura 48 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3A - Matriz de Quartzo)	46
Figura 49 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M3A - Matriz Feldspato)	47
Figura 50 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3A - Matriz Feldspato)	47
Figura 51 - Modelo de cálculo (M3B) e disposição dos minerais	47
Figura 52 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M3B - Matriz de Quartzo)	48
Figura 53 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3B - Matriz de Quartzo)	48
Figura 54 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3B - Matriz de Feldspato)	49
Figura 55 - Modelo de cálculo (M3C) e disposição dos minerais	49
Figura 56 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M3C - Matriz de Quartzo)	49
Figura 57 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3C - Matriz de Quartzo)	50
Figura 58 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3C - Matriz de Feldspato)	50
Figura 59 - Modelo de cálculo com simetria (M4)	51
Figura 60 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M4 - Matriz de Quartzo)	52
Figura 61 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M4 - Matriz Quartzo)	52
Figura 62 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M4 - Matriz Feldspato)	53
Figura 63 - Modelo de cálculo com minerais alinhados (M5)	53

Figura 64 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M5 - Matriz de Quartzo)	54
Figura 65 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M5 - Matriz de Quartzo)	54
Figura 66 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M5 - Matriz de Feldspato)	55
Figura 67 - Primeiro Modelo de cálculo com minerais desalinhados	55
Figura 68 - Modelo de cálculo com minerais desalinhados (Modelo M6 - Matriz de Quartzo)	56
Figura 69 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M6 - Matriz de Quartzo)	56
Figura 70 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M6 - Matriz de Quartzo)	56
Figura 71 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M6 - Matriz de Feldspato)	57
Figura 72 - Modelo de cálculo com fissura (Modelo M7 - Matriz de Quartzo)	58
Figura 73 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo M7 - Matriz de Quartzo)	58
Figura 74 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M7 - Matriz de Quartzo)	59
Figura 75 - a) Modelo M7 - Matriz de Feldspato; b) Modelo de escoras e tirantes	59
Figura 76 - Modelo de cálculo com disco diamantado (Modelo MDD)	60
Figura 77 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)	61
Figura 78 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)	62
Figura 79 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)	62
Figura 80 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Feldspato)	63
Figura 81 - Modelo de cálculo para fio diamantado (Modelo MFD)	63
Figura 82 - Diagramas de tensões $\sigma_y$ e $\sigma_x$ respectivamente (Modelo MFD - Matriz de Quartzo)	64
Figura 83 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo MFD - Matriz de Quartzo)	65
Figura 84 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)	65
Figura 85 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Feldspato)	66
Figura 86 - Vista geral da montagem e do equipamento de carga	68
Figura 87 - Esquema de corte dos provetes	68
Figura 88 - Tolerância do corte (sem escala)	69
Figura 89 - Exemplo de defeito	70
Figura 90 - Aparelho de Ultra-sons	70
Figura 91 - Faces analisadas com Ultra-som	71
Figura 92 - Aparelho de caracterização de superfícies	72
Figura 93 - a) Vista em planta; b) Vista em alçado	73
Figura 94 - Vista do posicionamento dos extensómetros	73
Figura 95 - Calibração dos extensómetros	74
Figura 96 - Diagrama Tensão - Extensão	75
Figura 97 - Provede 5 - Configuração Inicial	76
Figura 98 - Provede 5 - Macrofissuras na rotura (face E0, macaco à direita)	76
Figura 99 - Diagrama tensão-extensão do Provede 5	77
Figura 100 - Provede 5 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	77
Figura 101 - Provede 3 - Planos de rotura e cunha resultante (face E0, macaco à direita)	78
Figura 102 - Diagrama tensão-extensão do Provede 3	78

Figura 103 - Provete 3 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	79
Figura 104 - Provete 2 - Contacto com a chapa de carga (face E0)	79
Figura 105 - Provete 2 - Fissura inicial (Face E0, macaco à direita)	80
Figura 106 - Provete 2 - Momento da Rotura (Face E1, macaco à esquerda)	80
Figura 107 - Diagrama tensão-extensão do Provete 2 (fase inicial)	80
Figura 108 - Provete 2 - Vista da face E1 (marcada a verde, macaco à esquerda)	81
Figura 109 - Provete 6 - Contacto com as chapas (Face E1)	81
Figura 110 - Diagrama tensão-extensão do Provete 6	82
Figura 111 - Provete 6 - Vista da face E0 (macaco à direita)	82
Figura 112 - Provete 6 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	82
Figura 113 - Provete 4 - Contacto com as chapas de carga, vista da face E1 e E3 respectivamente	83
Figura 114 - Provete 4 - Início da Rotura (saída de pó da face E4 - macaco à esquerda)	83
Figura 115 - Diagrama tensão-extensão do Provete 4	84
Figura 116 - Provete 4 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	84
Figura 117 - Provete 1 - Contacto com a chapa de carga (Face E1)	85
Figura 118 - Diagrama tensão-extensão do Provete 1	85
Figura 119 - Provete 1 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	86
Figura 120 - Provete 15 - a) Contacto com chapa de carga (vista da face E3); b) Superfície defeituosa	86
Figura 121 - Provete 15 - a) Primeiro destacamento de matéria (face E1), b) Rotura (Formação de microfissuras)	86
Figura 122 - Diagrama tensão-extensão do provete 15	87
Figura 123 - Provete 15 - Vista da face E0 (macaco à direita)	87
Figura 124 - Provete 16 - a) Defeito da superfície; b) Contacto com chapa (face E3)	88
Figura 125 - Provete 16 - a) Sequência de rotura; b) Rotura (face E0 - macaco à direita)	88
Figura 126 - Diagrama tensão-extensão do Provete 16	89
Figura 127 - Provete 16 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	89
Figura 128 - Provete 12 - a) Contacto com chapa de carga; b) Junta (face E1)	90
Figura 129 - Provete 12 - Rotura (face E0 - macaco à direita)	91
Figura 130 - Diagrama tensão-extensão do Provete 12	91
Figura 131 - Provete 12 - Vista da face E1 (traços vermelhos) (macaco à esquerda)	91
Figura 132 - Provete 9 - Junta (face E1)	92
Figura 133 - Provete 9 - Rotura (face E1)	92
Figura 134 - Diagrama tensão-extensão do Provete 9	93
Figura 135 - Provete 9 - Vista da face E0 (macaco à direita)	93
Figura 136 - Provete 7 - Montagem do provete 7	94
Figura 137 - Provete 7 - Juntas	94
Figura 138 - a) Destacamento de material; b) Início da rotura (face E1)	94
Figura 139 - Diagrama tensão-extensão do Provete 7	95

Figura 140 - Provete 7 - Vista da face E0 (riscos a verde) (macaco à direita)	95
Figura 141 - Provete 8 - Montagem do provete	96
Figura 142 - Provete 8 - Início da rotura (face E1)	96
Figura 143 - Diagrama tensão-extensão do Provete 8	96
Figura 144 - Provete 8 - Vista da face E3 (macaco à esquerda)	97
Figura 145 - Provete 10 - Pormenor de junta da face E0 e E3. Arestas com diferentes dimensões	97
Figura 146 - Provete 10 - a e b) Início da rotura (face E1)	98
Figura 147 - Diagrama tensão-extensão do Provete 10	98
Figura 148 - Provete 10 - Vista da face E4 (traços pretos) (macaco à esquerda)	99
Figura 149 - Provete 11 - Junta (face E3)	99
Figura 150 - Provete 11 - a) Início da rotura; b) Saída de pó (face E0 - macaco à direita)	100
Figura 151 - Diagrama tensão-extensão do Provete 11	100
Figura 152 - Provete 11 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)	101
Figura 153 - Provete 13 - Junta (face E3)	101
Figura 154 - Diagrama de tensão-extensão do Provete 13	102
Figura 155 - Provete 13 - Após rotura (face E0 e E3 - macaco à direita)	102
Figura 156 - Vista da face E0 (macaco à direita)	103
Figura 157 - Provete 14 - a) Defeito da superfície; b) Fissura a 3,5 cm da face	103
Figura 158 - Provete 14 - Rotura (face E1)	104
Figura 159 - Diagrama tensão-extensão do Provete 14	104
Figura 160 - Provete 14 - Vista da face E0 (macaco à esquerda)	105
Figura 161 - Efeito de carga pontual	108
Figura 162 - Distribuição de tensões de rotura para provetes sem junta	110
Figura 163 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com junta	111
Figura 164 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com falta de ortogonalidade	112
Figura 165 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com superfície de encosto com curvatura	113
Figura 166 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com rotura provocada pela cintagem devida à rigidez transversal das chapas	114



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Irregularidades de uma superfície [12]	12
Tabela 2 - Principais minerais das rochas eruptivas (adaptado de [22])	17
Tabela 3 - Sistemas cristalinos dos minerais mais comuns (adaptado de [23])	18
Tabela 4 - Sistemas cristalinos dos minerais mais comuns (adaptado de [23]) - Continuação	19
Tabela 5 - Tipos e subtipos de textura [22]	20
Tabela 6 - Escala de Mohs vs Número de Vickers [26]	22
Tabela 7 - Comparação entre técnicas de lavra [29]	27
Tabela 8 - Factores que afectam o desgaste de serras circulares [33]	31
Tabela 9 - Tipos de desgaste [33]	32
Tabela 10 - Influência da dimensão do grão	51
Tabela 11 - Tempo de atravessamento dos Ultra-sons do Provette 8	71
Tabela 12 - Determinação do Módulo de Elasticidade (E)	76
Tabela 13 - Síntese dos ensaios realizados.	106
Tabela 14 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes sem junta	109
Tabela 15 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes sem junta (com defeitos pouco relevantes)	110
Tabela 16 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com junta	111
Tabela 17 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com falta de ortogonalidade	112
Tabela 18 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com superfície de encosto com curvatura	113
Tabela 19 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com rotura provocada pela cintagem	114
Tabela 20 - Tensões características em função da qualidade da junta	115
Tabela 21 - Valores de $\alpha$ e $\beta$	116



# Lista de Acrónimos

UBI	Universidade da Beira Interior
SEM	Scanning Electron Microscope
MEF	Método dos elementos finitos
ISRM	International Society of Rock Mechanics
$\sigma_r$	Tensão de rotura
$\sigma_{rk}$	Tensão de rotura característica
$f_{gk}$	Tensão resistente característica do granito em compressão
$f_{gd}$	Tensão resistente de dimensionamento do granito em compressão



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Contexto histórico

A cantaria de granito é utilizada na construção há muitos séculos existindo actualmente em bom estado de conservação bastantes exemplos deste tipo de construção provenientes desde o Império Romano, a época Renascentista até ao século XX de que são exemplos o Museu Hagia Sophia de Istambul cuja construção iniciou em 532 [b] (Figura 1) o Aqueduto de los Milagres em Mérida [a] (Figura 2) completo no ano 300, a Ponte da Portela no Rio Sabor do séc. XVI [g] e várias catedrais construídas na Europa como a Catedral de Notre Dame cuja construção terminou em 1345 [e]. No século XX aconteceu um ponto de viragem nos métodos construtivos com o surgimento do betão armado. Em Portugal existem muitos exemplos de construção com cantaria de granito desde monumentos de relevo histórico a modestas construções tanto em zonas urbanas como rurais. Estas construções existem principalmente no norte e interior de Portugal continental onde o granito é mais abundante em contraste com o sul onde o material mais utilizado na construção de cantaria é o calcário. Como principais marcos deste tipo de construção em Portugal temos por exemplo o Castelo de Guimarães, Santuário do Bom Jesus de Braga, várias igrejas espalhadas pelo país e também pontes totalmente em cantaria de granito construídas durante a ocupação Romana, ou apenas nos pilares como é comum nas pontes construídas já no século XVIII e XIX como é exemplo a ponte sobre o Rio Tejo em Constância (Figura 3).



Figura 1 - Museu Hagia Sophia, Istambul (Turquia) [b]



Figura 2 - Aqueduto de Los Milagros, Mérida (Espanha) [a]



Figura 3 - Ponte Ferroviária de Constância/Praia do Ribatejo [f]

Neste tipo de construção, as paredes e pilares têm função resistente sendo elas as responsáveis por encaminhar as cargas para a fundação provenientes de arcos e abóbadas muito comuns naquela época em que a resistência à compressão é também fulcral. Devido ao desconhecimento à época do comportamento mecânico dos materiais este tipo de estruturas é normalmente muito sobredimensionada já que o granito tem grande resistência à compressão e as tensões resultantes são muito inferiores às tensões de rotura do granito. Resulta daqui um grande peso próprio destas estruturas que aumenta as forças de compressão em jogo mas que acabam por ser importantes no equilíbrio dos arcos e abóbadas de cantaria. Aqui entra a importância das juntas na resistência à compressão da cantaria de granito e no equilíbrio dos esforços em jogo nestas estruturas. As juntas têm um papel importante pois têm influência no surgimento de fissuras que condicionam a resistência da cantaria fazendo com que a resistência global do conjunto seja reduzida, quando comparada com a resistência do material.

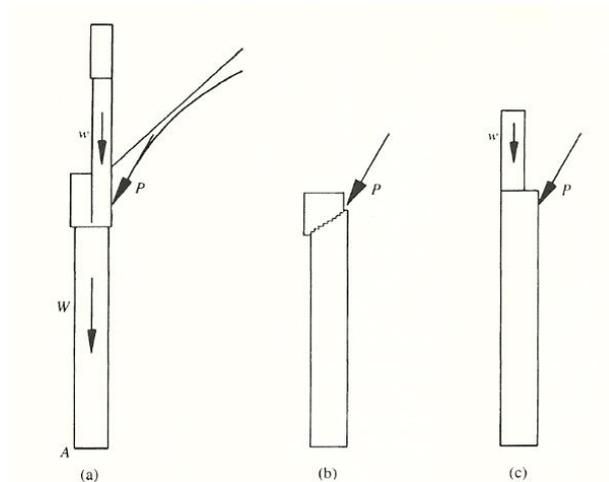


Figura 4 - a) Forças que actuam nos arcos; b) Rotura por corte; c) Prevenção da rotura (adaptado de [2])

Na época renascentista a preocupação com as tensões nos materiais era considerada de importância secundária pois considerava-se que a forma da estrutura era mais importante e a sua estabilidade dependia disso. Tudo se resumia a um problema de geometria [2]. Devido a isso a forma, dimensão e localização das juntas eram condicionadas pelas dimensões dos blocos utilizados. À época o transporte e colocação de elementos de peso elevado seria de extrema dificuldade, mas ainda assim em muitos dos mais importantes monumentos eram utilizados blocos de grandes dimensões para a construção de colunas. Os elementos constituintes de arcos, abobadas, cúpulas, etc., eram de menores dimensões, facilitando a colocação e a obtenção da curvatura desejada. Como exemplo a construção das abóbadas era iniciada de forma simétrica das “costelas” (*ribs* em Língua Inglesa) e depois também de forma simétrica (para não criar desequilíbrio) eram colocados os blocos que preenchiam o espaço entre “costelas”. Estes arcos transferem as cargas para as paredes que têm de ser suficientemente rígidas para absorver os impulsos provenientes do arco e impedir que haja deslocamentos horizontais, pois estes mudariam a forma dos arcos e a resultante das compressões poderia ser alterada (Figura 4). Caso esta resultante sai-se fora da secção do arco, surgiriam tracções e os blocos poderiam cair. Apesar disso os arcos terão baixas forças de compressão, que mesmo assim são importantes para manter os blocos na sua posição devido ao atrito entre as superfícies. Caso as paredes não fossem rígidas o suficiente era comum o recurso a contrafortes (Figura 5) [2].

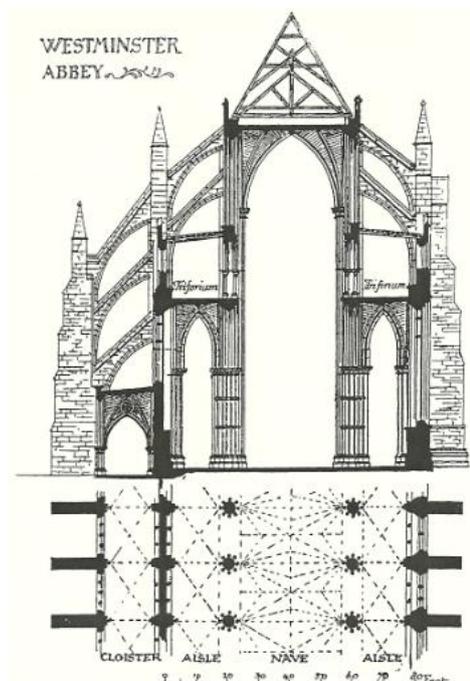


Figura 5 - Contrafortes da Abadia de Westminster

A orientação dos blocos pode também ser importante na fase construtiva, como por exemplo no caso de abóbadas. As abóbadas podem ser construídas colocando os blocos orientados segundo a direcção do arco ou na direcção perpendicular a este. No primeiro caso não é necessária a colocação de um cimbra ao contrário do segundo caso em que já não é possível construir sem a ajuda do mesmo. Apesar de as juntas e blocos possuírem orientações diferentes, o comportamento da estrutura é em teoria o mesmo, porque segundo o autor [2] a longo prazo o comportamento de ambos é divergente, dependendo da forma como surgirão fissuras e se formem os mecanismos de equilíbrio.

## 1.2. Investigação recente em estruturas de pedra

Apesar de este tipo de construção não ser o mais praticado na actualidade existem algumas investigações de sobre a temática da cantaria e alvenaria de pedra. Acerca do estudo das juntas e da sua influência no comportamento da cantaria de granito existe pouca investigação. Este tema já foi abordado, por [3] na sua dissertação “Concepção e análise estrutural de um novo tipo de pilar esbelto em granito”. Durante a sua investigação colocou-se a questão de como as juntas influenciavam a resistência dos elementos de granito. Ainda poucos estudos sobre o comportamento das estruturas de alvenaria e cantaria de pedra. Vasconcelos e Lourenço [4] [5] desenvolveram vários trabalhos experimentais sobre o comportamento de paredes de alvenaria. Estes investigadores registaram, tal como Clemente Pinto, que a resistência da cantaria sob compressão é superior quando as juntas são “suaves”, ou seja, com pouca rugosidade quando comparadas com superfícies com acabamento mais rugoso. As superfícies mais rugosas não permitem o total contacto entre as duas superfícies e acabam por gerar nos pontos de contacto tensões elevadas que provocam o aparecimento de

fissuras segundo a direcção de aplicação da carga. Esta visão contraria o modelo de Mohr - Coulumb, que sugere que a rotura se dá segundo um plano inclinado, em função da direcção das tensões principais e das tensões tangenciais. Gramberg [6], já apontava que o aparecimento de fissuras seria segundo a direcção de aplicação das cargas e descreve sucintamente todas as fases da rotura do granito sob tensão axial (Figura 6). Também Manuel Rocha no seu livro “Mecânica das Rochas” indica e descreve os vários modos de rotura [7].

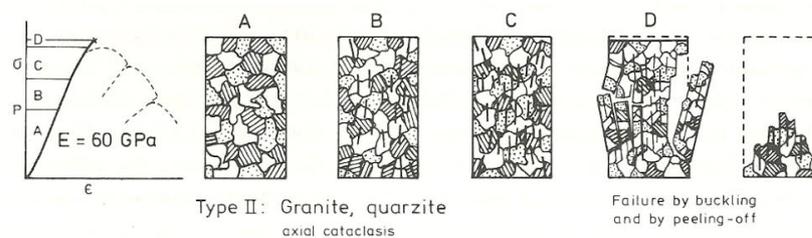


Figura 6 - Rotura sobre compressão, típica de paredes de túneis em rocha [6]

O estudo das juntas no comportamento mecânico no comportamento do granito não é apenas uma temática da Engenharia Civil. Noutras áreas como a Geologia, investiga-se o problema da tectónica de placas e respectivas falhas geológicas, onde se coloca também o problema da forma e rugosidade das superfícies.

Este problema é mais proeminente na Engenharia de Minas onde os trabalhos a altas profundidades implicam a escavação sobre grandes tensões de compressão devido ao peso próprio da rocha, podendo esta ter juntas entre os blocos que formam o maciço ou simplesmente fissurar devido às tensões que lhe são impostas. Vários autores [6] [1] [8] têm estudado o granito e a sua rotura também devido às consequências do processo de perfuração e corte da rocha na construção de túneis que pode induzir microfissuração da rocha afectando a redistribuição de tensões junto da abertura, a sua estabilidade e a permeabilidade. Procura-se construir túneis com reduzida utilização dos suportes tradicionais aumentando a sua eficiência e capacidade para por si próprio suportar as tensões na sua periferia. As mudanças de qualidade da rocha, geometria da escavação podem gerar relaxação nas rochas e provocar o colapso de rochas que eram estáveis [9].

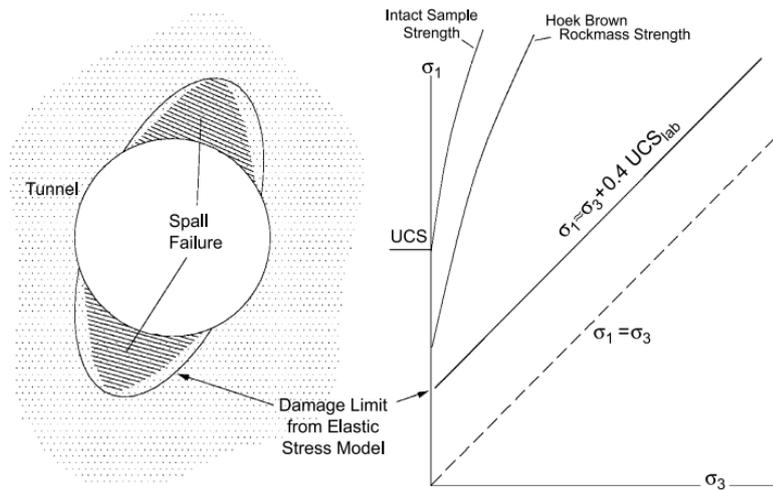


Figura 7 - Limite empírico para os danos em rocha moderadamente fracturada [9]

Na Engenharia de Minas e mais em específico nos túneis a questão da propagação de fissuras é muito importante. O processo construtivo introduz fissuração no maciço e a propagação das fissuras é muito sensível a baixas tensões de confinamento na proximidade da escavação o que pode resultar no fenómeno de *spalling*, ou seja fragmentação da rocha (Figura 7).

# Capítulo 2

## Objectivos

### 2.1. Observação

O granito é uma rocha constituída por vários minerais de diferentes tamanhos, formas e durezas tornado as superfícies irregulares após serradas ou cortadas. A nível macroscópico estas superfícies tendem a parecer perfeitamente lisas, ou seja pouco rugosas, mas visualizando em maior profundidade, a nível microscópico verifica-se que na realidade existem sempre imperfeições determinadas pelos minerais constituintes da superfície. Essas imperfeições fazem diminuir a área que efectivamente contacta entre as duas superfícies, e as forças que se transmitem entre os blocos provocam tensões elevadas fazendo com que surjam fissuras. À medida que se vai aplicando força, as tensões aumentam e as fissuras propagam-se levando o granito à rotura. As construções clássicas não exploravam a elevada resistência do granito. Com o presente trabalho pretende-se dar uma contribuição para o projecto e construção de estruturas mais esbeltas com tensões elevadas explorando o granito até níveis mais próximos da rotura. Para tal acontecer as juntas entre os blocos devem ser bem projectadas e executadas para não prejudicar a resistência do conjunto

### 2.2. Formulação do problema

Procura-se saber então como minimizar este problema, de forma a conseguir aproveitar melhor a resistência do material em si, sem esta ser condicionada pelas tensões que surgem nas fronteiras entre as duas superfícies. As imperfeições aqui descritas não se referem apenas às geradas pelos minerais constituintes da superfície, mas também devidas às tecnologias de corte utilizadas. Para além de das diferentes tecnologias poderem resultar superfícies com acabamentos diferentes existem sempre falhas e desgaste do material que produzem defeitos que à vista desarmada podem ser irreconhecíveis mas que são importantes no contacto das superfícies das juntas.

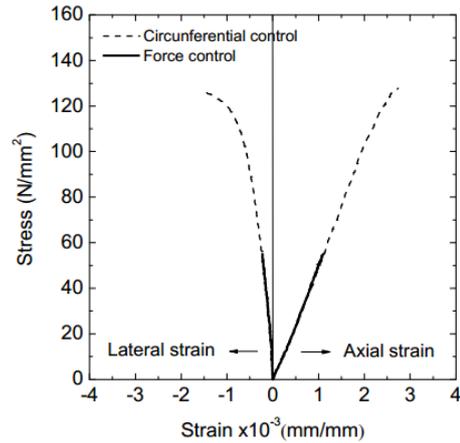


Figura 8 - Diagrama tensão-extensão típico do granito de Alta resistência [4]

### 2.3. Questões Prévias

O trabalho realizado tem como principal objectivo contribuir para o esclarecimento de que forma se podem realizar as juntas entre elementos de cantaria de granito de alta resistência, de forma a minimizar o seu efeito no decréscimo da resistência à compressão do conjunto. Para obter resposta a esta questão é necessário conhecer:

- Qual o valor dos parâmetros de rugosidade para os diversos tipos de acabamento;
- Como é que a mineralogia do granito influencia a forma e rugosidade das superfícies de contacto;
- A influência da rugosidade das juntas no comportamento e resistência global da cantaria;
- Como se deve executar a junta, de forma a maximizar a resistência à compressão do conjunto.
- Tolerâncias máximas nas dimensões das juntas dependendo do nível de carga aplicado.

# Capítulo 3

## Metodologia

O presente capítulo tem como objectivo resumir os métodos e técnicas utilizadas na discussão e teste das hipóteses abordadas a nível experimental e numérico. Como referido no capítulo anterior o objectivo principal é estudar como a junta influencia a resistência à compressão da cantaria e com base nos resultados poder estabelecer critérios para o projecto das juntas. Para tal é necessário conhecer o processo de corte das superfícies e a qualidade resultante desses processos que serão apresentados no Capítulo 4.

A análise experimental implica a realização de ensaios de compressão uniaxial de provetes de granito de alta resistência com juntas executadas de diferentes formas produzindo diferentes resultados. Para contabilizar a influência do tipo de corte da pedra são realizados ensaios de microscopia electrónica a amostras dos provetes para determinar os parâmetros de rugosidade.

Foi realizada também uma análise numérica com o objectivo de entender os mecanismos de equilíbrio dentro de granito testando várias hipóteses que simulariam a presença dos grãos que constituem o granito, o surgimento de fissuras e as juntas.

### 3.1. Visitas de estudo e Inquéritos

Foram realizados contactos no sentido de apurar junto de empresas fornecedoras e de reparação de equipamentos de corte de rocha quais as avarias mais comuns nestes equipamentos e as suas consequências. Tantos nos equipamentos de fio diamantado como nos discos o desgaste da pasta que envolve os diamantes poderá fazer com que estes se soltem e resultem vazios e irregularidades que poderão riscar a superfície. Com discos diamantados ocorre ainda o problema de com o desgaste dos diamantes, poderem surgir empenos e as superfícies ficarem com riscos profundos.

Ao observar o corte dos provetes na empresa fornecedora foi possível verificar que o modo como os equipamentos de corte com disco diamantado pode influenciar o resultado final. Quando o corte é feito tendo o disco numa posição fixa e a pedra em movimento podem resultar superfícies empenadas devido a desvios no movimento do bloco causados, ou não pelo operador. Caso seja o disco a movimentar-se e a pedra a estar fixa a superfície é desempenada, devido não só ao sistema de fixação da pedra mas também à inércia da mesma que ajuda a mantê-la na posição correcta.

### 3.2. Ensaio experimental em laboratório

O ensaio de carga é efectuado através de um conjunto formado por um macaco hidráulico que reage contra travessas à custa de varões (Figura 86). Em contacto com as travessas estarão placas de aço dimensionadas para que a carga seja aplicada aos provetes de forma o mais uniforme possível. São medidas a força aplicada pelo macaco e extensões longitudinais durante o processo de carga, para uma melhor interpretação dos fenómenos observados e experimentados pelo granito ao longo das várias fases de carga recorrendo a uma célula de carga e a vários extensómetros colocados nas várias faces dos provetes. Os pilares eram constituídos por vários blocos e tinham uma altura total de 0,6m e secção transversal de 0,1 x 0,1 m.

Segundo [10] a resistência à compressão simples de um grupo de provetes tende a estabilizar para relações L/D (altura/dimensão da base) de 3 pois o efeito de escala deixa de se fazer sentir. Esta relação é a que tem menor dispersão de valores de resistência à compressão uniaxial e por isso caracterizam melhor o material. A maioria dos ensaios laboratoriais utiliza relações L/D relativamente baixas, entre 1 e 2. Outros autores [11] observaram que quando a relação L/D é reduzida para 0,5 a rotura deixaria de ser rotura por corte mudando para rotura por *slabing*. A resistência da rocha está directamente relacionada com a relação L/D. Os ensaios realizados no âmbito deste trabalho exploram relações de L/D de cerca de 6, no sentido de esclarecer a relevância dos efeitos de cintagem junto às placas de aço das extremidades.

Numa última fase dos ensaios foi inicialmente prevista mas posteriormente dispensada a observação de superfícies de corte com recurso ao microscópio electrónico de varrimento, para avaliar a respectiva rugosidade. Dos resultados desta técnica surgirão imagens do perfil da superfície a partir da qual se determinarão os parâmetros de rugosidade. Os principais parâmetros de rugosidade utilizados para a caracterização da superfície serão a rugosidade média, a altura máxima pico-vale e a amplitude máxima de rugosidade.

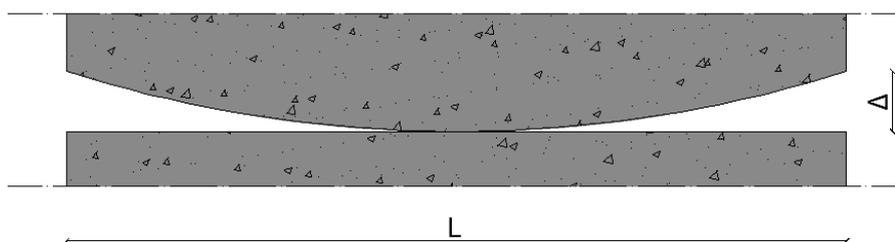


Figura 9 - Perfil transversal tipo da junta ( $\Delta$  = tolerância)

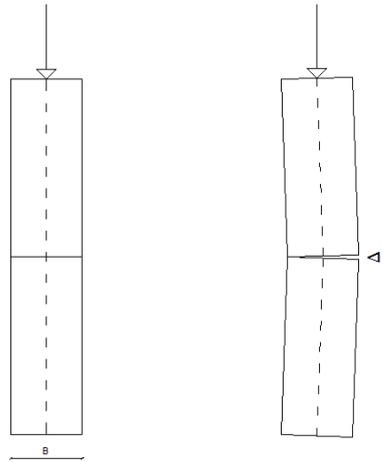


Figura 10 - Problemas de encurvadura devidos a defeitos

Em suma a análise experimental decorrerá da seguinte forma:

- 1) Ensaio de carga
  - a. Dos provetes sem junta
  - b. Dos provetes serrados com disco diamantado
  - c. Dos provetes serrados com fio diamantado
  
- 2) Cálculo da rugosidade
  - a. Obtenção de amostras para a microscopia electrónica
  - b. Obtenção de imagens das superfícies de contacto
  - c. Determinação dos parâmetros de rugosidade
  
- 3) Análise dos resultados
  - a. Técnica de corte vs rugosidade
  - b. Rugosidade vs resistência à compressão

### 3.3. Quantificação da rugosidade

A rugosidade é um dos parâmetros caracterizadores do grau de acabamento de uma superfície e da regularidade da mesma. Após o processo de preparação do bloco, as superfícies não ficam totalmente lisas, embora ao nível macroscópico assim pareçam. Na realidade continuam a existir “asperezas” na superfície determinadas pelo processo de corte e pelas características mecânicas dos minerais constituintes das rochas, visto os minerais apresentarem forma, tamanhos e durezas diferentes. A Tabela 1 e Figura 11 resumem o tipo de erros comuns no corte de rocha [12].

Tabela 1 - Irregularidades de uma superfície [12]

CATEGORIA	TIPO	CARACTERÍSTICAS
Grande Escala	Erro de forma	Razão espaçamento/altura $\geq 1000$ ; pode representar eventuais empenos de chapas.
Pequena Escala	Ondulação	Razão espaçamento/altura 100-1000; representa as irregularidades mais extensas, mais largas, de nível superior ao da rugosidade; o comprimento de avaliação é superior ao utilizado para a determinação da rugosidade: a rugosidade encontra-se sobreposta ao perfil macrométrico da ondulação.
	Rugosidade	Razão espaçamento/altura 5-100; na prática, representa as irregularidades micrométricas e finamente espaçadas.
	Defeitos	Falhas que podem estar incluídas na medição da superfície, normalmente indicadas por inspeção visual: presença de poros, físsuras ou pequenos sulcos provocados pelo arrancamento de minerais no processo de serragem.

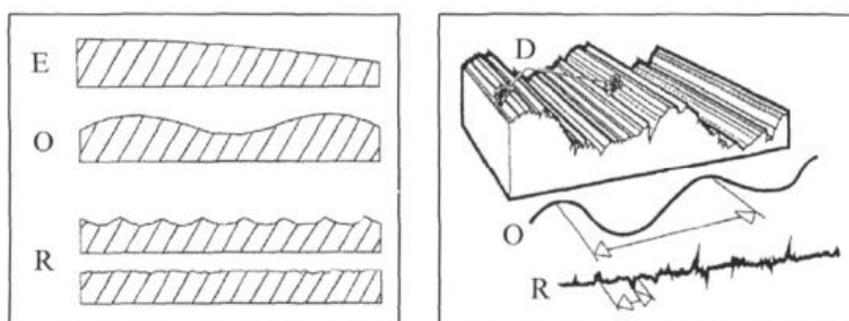


Figura 11 - Irregularidades de superfícies: E - Erro de forma; O - ondulação; R - rugosidade; D - defeitos [12]

A forma da superfície terá um papel fundamental no desempenho da junta já que esta influencia a área que realmente contacta e pode introduzir desvios na orientação dos blocos, ou seja, contribuir para a perda de verticalidade dos mesmos. A perda de verticalidade pode acelerar o processo de ruína devido à introdução de excentricidades e posterior mudança do diagrama de tensões.

### 3.3.1. Métodos de quantificação da rugosidade

Existem actualmente vários processos para quantificação da rugosidade (Figura 12), que permitem avaliações em duas e três dimensões. Os vários equipamentos existentes podem ou não contactar com a superfície, sendo designados por sistemas com ou sem contacto, respectivamente [13].

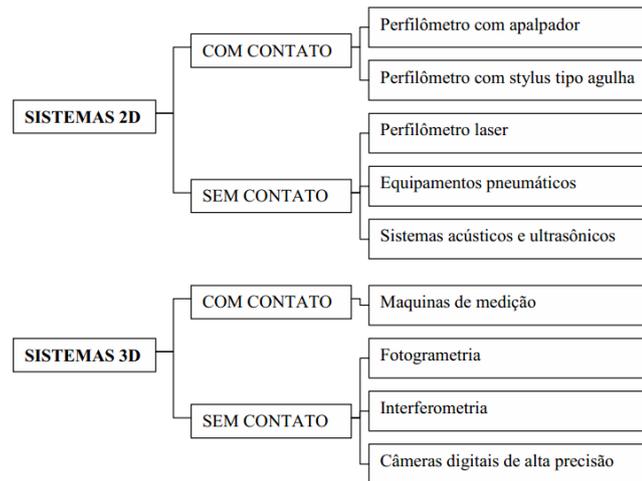


Figura 12 - Métodos de quantificação da rugosidade [13]

O método mais popular para medir a rugosidade é o perfilômetro com stylus (estilete) tipo agulha, também conhecido por rugosímetro, que é um aparelho muito utilizado na Engenharia Mecânica em problemas relacionados com a lubrificação. O rugosímetro faz a medição do perfil vertical da superfície através do contacto de uma ponta de diamante muito fina ( $2\mu\text{m}$ ). A ponta é assente sobre a superfície desejada e percorre esta ao longo do comprimento de amostragem seleccionado. As oscilações do estilete são registadas pelo aparelho e reproduzidas no monitor ou em papel. A imagem da superfície reproduzida pelo aparelho não é a real, já que a ampliação vertical é diferente da horizontal [13].

Existem também outros métodos de avaliação da rugosidade. No caso em estudo, considerou-se a hipótese da utilização da interferometria, que posteriormente foi abandonada já que a superfície do granito contém minerais escuros e os corpos negros absorvem a radiação sobre eles incidente e isso iria introduzir erros na avaliação da rugosidade. A utilização do rugosímetro também foi considerada, mas foi abandonada pois este foi inicialmente desenvolvido para o estudo de metais que possuem valores de rugosidade muito inferiores aos do granito. Do trabalho desenvolvido por [14] foram obtidos valores dos parâmetros de rugosidade com um rugosímetro mas que podem não ser os mais precisos com recurso a este equipamento, visto que este tem um valor máximo de amplitude de deslocamento vertical que consegue medir e esses pontos de valores superiores ao máximo podem não ser efectivamente medidos e registados.

### 3.4. Modelação numérica

Com o objectivo de melhor entender o comportamento do granito em compressão é necessário compreender a forma com as forças aplicadas exteriormente são distribuídas e equilibradas internamente, ou seja interpretar qual o caminho das forças dentro do granito. Após a identificação do caminho das forças é possível prever onde surgirão as fissuras que são consequência de tensões de tracção superiores à resistência do material em tracção.

Nesta modelação foram apenas considerados os dois minerais mais abundantes no granito: o Feldspato e o Quartzo. Considerando apenas a presença deste dois minerais é necessário definir as proporções entre si e o seu posicionamento relativo, tendo sido recolhidos e adaptados dados de [15] [16] [17]. A proporção adaptada (desprezando outros minerais como a biotite e os minerais acessórios) e considerada mais representativa entre os dois minerais e a aplicada nesta análise é de aproximadamente 60% Feldspato e 40% Quartzo. Na questão do posicionamento relativo dos minerais, considerou-se que o Quartzo funcionava como matriz do material envolvendo o Feldspato. Tal consideração é feita tendo em conta as Séries de Bowen [18] e as respectivas temperaturas de cristalização dos minerais. O Quartzo surge depois do Feldspato. Embora a gama de temperaturas de cristalização seja entre os 135 e 195°C [18], é provável que o “Quartzo potencial” ainda esteja fluído quando se formam os Feldspatos. Outros autores referem que é possível também ocorrer o oposto em que o Feldspato é a matriz do material envolvendo o Quartzo [15] [19].

# Capítulo 4

## O Granito

### 4.1. Mineralogia, Textura e Propriedades Mecânicas dos Minerais

#### 4.1.1. Mineralogia

De relevante importância para o estudo da influência das juntas no desempenho da cantaria, é conhecer a mineralogia do material com que estamos a lidar. O granito inclui-se no grupo das rochas ígneas ou eruptivas, resultantes de massas em fusão ígnea do interior da Terra. À medida que o magma vai arrefecendo, há cristais específicos que se vão formando em determinados valores de temperatura. A gama de temperaturas de cristalização situa-se entre os 135 e 195 °C, apesar de todas as fases começarem a cristalizar muito mais cedo [18]. Os primeiros a iniciar a sua formação são os de ponto de fusão superior e à medida que o magma arrefece inicia-se a formação dos restantes minerais, de acordo com o seu ponto de fusão. As séries de cristalização de Bowen (Figura 13) descrevem de forma simplificada a sequência de cristalização dos minerais e estão divididas em dois ramos: série contínua (plagioclases) e série descontínua (minerais ferro-magnesianos) [d]. A série contínua indica a formação das plagioclases que se inicia nas mais ricas em cálcio e termina nas mais ricas em sódio. À medida que se formam as primeiras plagioclases mais ricas em cálcio, a temperatura vai diminuindo e os minerais que se formam sofrem progressivamente uma substituição do cálcio por sódio, surgindo os Feldspatos. A série descontínua indica a formação dos minerais máficos, desde as olivinas até à biotite. Acontece neste ramo que a olivina não se individualizam do magma e continua imersas no mesmo acabando por reagir e formar as piroxenas. Ao continuarem a reagir com o magma, as piroxenas produzem as anfíbulas e o processo acaba por terminar nas biotites.



Figura 13 - Séries de Bowen (adaptado de [d])

Apesar de as séries de Bowen (Figura 13) indicarem uma sequência de cristalização em função da temperatura, a determinação da sequência de cristalização de uma secção de rocha vulcânica é normalmente difícil, devido à gama restrita de temperaturas de fusão. Ainda assim é possível usar os fenocristais (cristais de maiores dimensões) para construir um diagrama que quantitativamente mostra a sequência de cristalização [20]. Segundo o mesmo autor, existe uma correlação entre a cristalinidade e o conteúdo de sílica. O tamanho dos minerais já formados influencia o surgimento de poros, onde o magma retido acabará também por cristalizar. Este processo de cristalização não é linear pois existem algumas fases em que o conteúdo de fenocristais é baixo e o magma está longe da sua fase líquida [20].

A taxa de crescimento dos cristais é influenciada pela mobilidade dos átomos e moléculas que formam o magma, ou seja é influenciada pela mobilidade do próprio magma [21]. A presença de fenocristais numa textura de grãos finos é interpretada como sendo resultado do movimento do magma que estava a cristalizar a baixo arrefecimento. Também são influentes na taxa de crescimento dos cristais a temperatura e a pressão. Esta velocidade de formação e de crescimento dos cristais acaba por controlar o tipo de textura que a rocha ígnea irá apresentar.

Como dito anteriormente, a gama de temperaturas de fusão dos cristais é relativamente pequena. Ainda assim dois minerais podem cristalizar em simultâneo até que um deles “colide” com o outro. Tal acontece com o Quartzo e o Feldspato. Algum do Feldspato começa a cristalizar sozinho e posteriormente inicia-se a cristalização também do Quartzo, cristalizando ambos em simultâneo, surgindo uma textura gráfica em rochas ígneas.

Os minerais podem surgir na rocha de várias formas. Estes podem apresentar forma cristalina nitidamente desenvolvida, designando-se de automorfos ou idiomorfos. Normalmente tal não acontece e diz-se então que podem ser xenomorfos ou alotriomorfos. De entre todos os minerais que constituem a rocha existem os chamados minerais essenciais que dão “carácter”

à rocha (Tabela 2). Os restantes, que podem existir acidentalmente têm a designação de minerais acessórios e em geral só são visíveis ao microscópio [22].

Tabela 2 - Principais minerais das rochas eruptivas (adaptado de [22])

<b>Principais Minerais das Rochas Eruptivas</b>	
<b><i>Félsicos</i></b>	<b><i>Máficos</i></b>
Feldspatos	Piroxenas
Quartzo	Anfíbolas
Feldspatoides	Olivina
	Micas negras

À vista desarmada é fácil distinguir estes dois grupos já que os minerais félsicos são claros e os máficos escuros. Com dito anteriormente constituem também o granito minerais acessórios que são frequentemente a apatite, magnetite, ilmenite, hematite, turmalina e granada. Os Feldspatos incluem-se no grupo dos minerais félsicos e formam em média 60% dos minerais das rochas eruptivas. Os principais Feldspatos são a Ortoclase, a Albite e Anortite (Tabela 2). Ao nível da clivagem estes apresentam duas clivagens principais exactamente ou aproximadamente perpendiculares. Segundo o mesmo autor a fractura segundo as direcções de clivagem dá superfícies planas e noutras direcções superfícies esquirolosas. Isto porque os minerais são por vezes maclados, ou seja, formados por duas metades. A dureza na escala de Mohs é de 6. A distinção destes minerais em relação aos Quartzos é relativamente fácil, excepto quando a rocha é de grão muito fino.

O Quartzo não apresenta planos de clivagem e tem fractura conchoidal. O brilho varia de vítreo a gorduroso. A sua dureza na escala de Mohs é superior à dos Feldspatos, na ordem dos 7.

No grupo dos minerais máficos (Tabela 2) enquadram-se as piroxenas. Os minerais deste grupo (Ortopiroxenas, Clinopiroxenas, Augite) apresentam cores que variam do negro, verde, castanho, branco e azul e têm brilho vítreo. A sua dureza varia entre 5 a 7. A Augite é a Piroxena mais comum e tem clivagem boa sob planos aproximadamente perpendiculares, sendo a sua fractura irregular.

As Anfíbolas apresentam vários grupos e dentro destes vários subgrupos, sendo por isso muito variadas. De todas estas variedades a mais comum é a Hornblenda. Estas encontram-se em prismas de arestas arredondadas e também na forma de grãos irregulares. A sua clivagem é perfeita e segundo planos oblíquos. Possuem fractura irregular. Ao nível da cor podem ser verde - anegrada ou castanha a negra. Tem dureza entre 5 a 6.

A Olivina aparece sob a forma de grãos com fractura conchoidal. Tem cor verde-amarelada a verde-azeitona. A sua dureza varia entre os 6,5 e 7. As Micas negras mais comuns são a Biotite

que possui uma cor escura, bastante visível na superfície do granito.

#### 4.1.2. Hábito e Forma

Uma das características dos minerais que constituem as rochas é a sua forma e hábito, que pode ser influenciadora da qualidade da superfície resultante do corte, visto que a sua estrutura oferece resistência à abrasão e com isso diminui a serrabilidade [12]. De acordo com [23] “forma” é o termo utilizado para indicar a aparência externa global. Em cristalografia a configuração externa é indicada pelo “hábito”. Designa-se como hábito de um mineral a forma característica e comum ou a combinação de formas em que o mineral se cristaliza. O hábito de um mineral inclui a configuração geral e as irregularidades do seu crescimento (quando de ocorrência comum).

Todos os minerais apresentam uma simetria definida que permite agrupá-los em diferentes classes (Tabela 3). Esta simetria resulta da repetição de um motivo (unidades químicas) em translações regulares a 3 dimensões. Demonstrou-se que existem apenas 32 combinações possíveis de simetria que deram origem às 32 classes cristalinas, apesar de a maioria dos minerais cristalizar-se em 15 classes.

Como algumas destas classes cristalinas possuem características de simetria em comum com outras estas classes podem ser agrupadas em conjuntos maiores denominados de sistemas cristalinos.

Tabela 3 - Sistemas cristalinos dos minerais mais comuns (adaptado de [23])

Sistema cristalino	Classe cristalina	Minerais mais comuns (presentes em rochas ígneas)
Isométrico	Hexaoctaédrica	
	Giroédrica	
	Hexatetraédrica	
	Diploédrica	
Hexagonal (divisão Hexagonal)	Biripamidal - dihexagonal	
	Trapezoédrica - hexagonal	Quartzo (alta temperatura)
	Piramidal - dihexagonal	
	Bipiramidal - ditrigonal	
	Bipiramidal - hexagonal	Apatite
	Piramidal - hexagonal	
	Bipiramidal - trigonal	
	Escalenoédrica - hexagonal	
	Trapezoédrica - trigonal	Quartzo (baixa temperatura)
	Piramidal - ditrigonal	

Tabela 4 - Sistemas cristalinos dos minerais mais comuns (adaptado de [23]) - Continuação

Sistema cristalino	Classe cristalina	Minerais mais comuns (presentes em rochas ígneas)
Hexagonal (divisão Romboédrica)	Romboédrica	
	Piramidal - trigonal	
Tetragonal	Bipiramidal - ditetragonal	
	Trapezoédrica - tetragonal	
	Piramidal - ditetragonal	
	Escalenoédrica - tetragonal	
	Bipiramidal - tetragonal	
	Piramidal - tetragonal	
	Biesfenoédrica - tetragonal	
Ortorrômico	Bipiramidal - rômica	Olivina
	Biesfenoédrica - rômica	
	Piramidal - rômica	
Monoclínico	Prismática	Moscovite e Ortoclase
	Esfenoédrica	
	Domática	
Triclínico	Pinacoidal	Feldspatos plagioclásicos
	Pedial	

#### 4.1.3. Textura das rochas eruptivas

A textura diz respeito às dimensões e arranjo dos minerais que constituem a rocha. Os vários tipos de texturas podem ser agrupados em tipos fundamentais e dentro destes algumas variedades. A textura depende da velocidade de arrefecimento do magma. Se o arrefecimento for muito rápido, pode não haver cristalização e as rochas resultantes são inteiramente vítreas, apenas contendo alguns cristais. Se pelo contrário o arrefecimento for lento há tempo para a formação dos cristais, surgindo daí rochas holocristalinas de grão relativamente grosseiro. Quando o arrefecimento é feito numa velocidade intermédia os grãos podem ser mais grossos ou menos finos. De acordo com [22] os tipos fundamentais de textura são (Tabela 5):

- Textura fanerítica;
- Textura microfanerítica;
- Textura afanítica;
- Textura vítrea.

A textura fanerítica (Figura 14) corresponde a rochas com grãos cristalinos de diâmetro superior a 5 mm (grão grosseiro) ou compreendido entre 5mm e 1 mm (grão médio). A textura microfanerítica corresponde a rochas formadas totalmente ou em grande parte por grãos

cristalinos de diâmetro inferior a 1 mm (grão fino). A textura afanítica (ou não fanerítica) corresponde a rochas formadas totalmente por grãos visíveis apenas com recurso a microscópio. Pode ser holocristalina ou hipocristalina.

Finalmente a textura vítrea corresponde a rochas formadas totalmente ou principalmente por vidro.

Convém definir os conceitos de holocristalina e hipocristalina. Define-se como holocristalina a rocha com mais de 90% de cristais e hipocristalina quando constituídas por uma parte vítrea e uma parte cristalina.

A classificação abrange também o tamanho relativo dos grãos. As rochas faneríticas podem ser equigranulares (Figura 15), ou seja são constituídas por cristais de tamanho semelhante. Pelo contrário podem apresentar cristais de tamanho superior aos restantes denominados de fenocristais (textura porfiróide) (Figura 15). As rochas afaníticas podem ser formadas por rochas que não se distinguem macroscopicamente (textura afírica) ou apresentam fenocristais. Estes podem ter dimensões superiores a 2 cm a dimensões tão pequenas que não são visíveis numa primeira análise. Apresenta-se de seguida um quadro resumo das classificações.

Tabela 5 - Tipos e subtipos de textura [22]

<b>Fanerítica</b>	<p>Rochas formadas por grãos cristalinos de diâmetro superior a 5mm (grão grosseiro) ou compreendido entre 5 e 1 mm (grão médio).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granular (rochas sensivelmente equigranulares)</li> <li>• Porfiróide (rochas com fenocristais)</li> </ul>
<b>Microfanerítica</b>	<p>Rochas formadas total ou principalmente por grãos cristalinos visíveis macroscopicamente, mas de diâmetro inferior a 1mm (grão fino)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microgranular (rochas sensivelmente equigranulares)</li> <li>• Microfírica (rochas com fenocristais)</li> </ul>
<b>Afanítica</b>	<p>Rochas formadas total ou principalmente por grãos que não se distinguem macroscopicamente (holocristalinas ou hipocristalinas)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afírica (sem fenocristais, ou raros)</li> <li>• Afanofírica (com fenocristais)</li> </ul>
<b>Vítrea</b>	<p>Rochas são formadas total ou parcialmente por vidro</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Holovítrea (sem fenocristais, ou raros)</li> <li>• Vitrofírica (com fenocristais)</li> </ul>



Figura 14- Textura fanerítica [c]

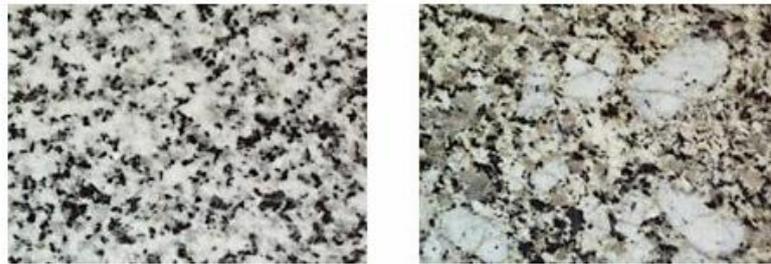


Figura 15 - Textura equigranular e textura porfiróide, respectivamente [c]

#### 4.1.4. Propriedades mecânicas dos minerais

A escala de Mohs (Tabela 6) é uma escala relativa entre os vários minerais e não é conclusiva acerca da verdadeira resistência mecânica. Existem outras escalas de dureza, como a escala de microdureza de Vickers e de Knoop. O ensaio de microdureza de Vickers (Figura 16) consiste na penetração de um diamante de geometria piramidal sobre uma superfície polida de um mineral. A penetração do diamante é medida em microscópio óptico e este valor é usado no cálculo da microdureza de Vickers [24]. Segundo trabalhos experimentais [25] à temperatura ambiente a ortoclase possui uma microdureza de 720 a 800 MPa, a Apatite entre os 550 e 670 MPa e o Quartzo cerca de 1000 MPa.

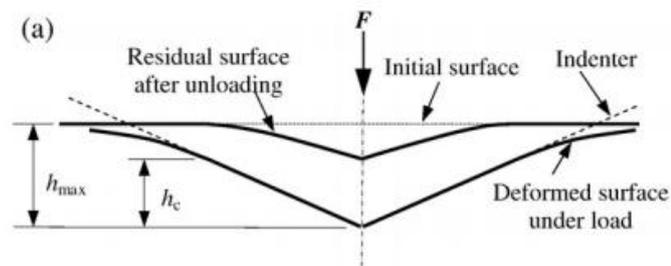


Figura 16 - Representação esquemática do processo de carga e descarga [24]

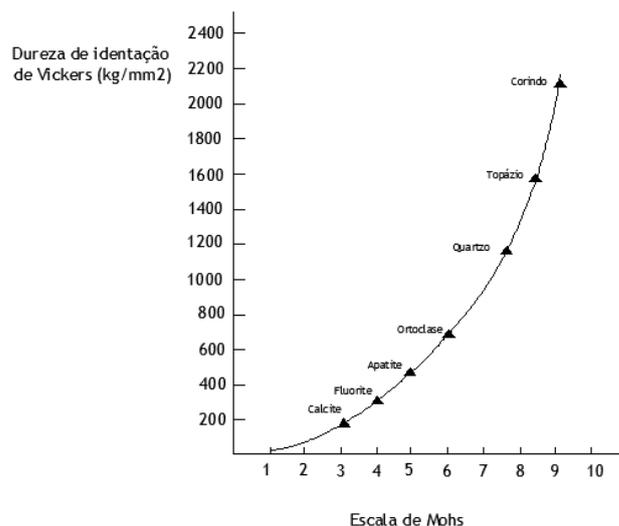


Figura 17 - Comparação entre escala de dureza de Mohs e escala de microdureza de Vickers [26]

Tabela 6 - Escala de Mohs vs Número de Vickers [26]

Mineral	Dureza	
	Escala de Mohs	Número de Vickers
Talco	1	47
Gesso	2	60
Calcite	3	145
Fluorite	4	200
Apatite	5	659
Ortoclase	6	715
Quartzo	7	1260
Topázio	8	1649
Corindo	9	2085

## 4.2. Comportamento mecânico do granito

Os granitos de Alta Resistência são geralmente constituídos por grãos finos e muito compactos e esta característica é o factor mais importante na resistência de uma rocha pois grãos maiores geram mais vazios entre si e têm mais planos fracos que provocam uma diminuição da resistência [5]. Geralmente o processo de microfissuração ocorre na ligação mais fraca da fronteira do grão mas quando os granitos são de grão fino com matrizes muito resistentes a fractura desenvolve-se através dos minerais e surgem superfícies lisas. De acordo com modelações numéricas [27] o início da fissuração surge na fronteira do Quartzo ou da Biotite e com o aumento do carregamento irão aparecer dentro do Quartzo e propagar-se-ão para dentro do Feldspato. A orientação destas fissuras é segundo a direcção da carga aplicada o que indica que tanto o Feldspato e o Quartzo dividem-se devido a esforços de tracção e tal

não acontece na Biotite por este mineral ser mais dúctil. É por isso comum verificar-se a presença de fissuras nos grãos vizinhos à Biotite.

Os esforços de tracção fazem parte do mecanismo de equilíbrio interno que se forma no interior do granito. Gramberg [6] propôs o diagrama de coesão para explicar este equilíbrio (Figura 18). Indica que cada mineral possui uma tensão transversal que pode ser de tracção ou compressão de forma a garantir o equilíbrio sendo a tracção a responsável pela coesão. As tensões são libertadas através da rotura de grãos separados distribuindo-a para os grãos próximos. Quando a resistência à tracção do grão é ultrapassada a coesão do sistema desaparece surgindo a fissura [6].

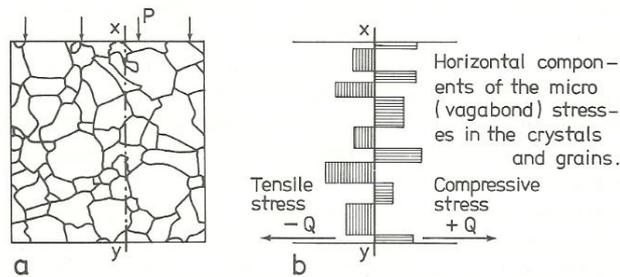


Figura 18 - Coesão transversal: a) Representação dos grãos no corte X-Y; b) Tensões nos grãos em equilíbrio [6]

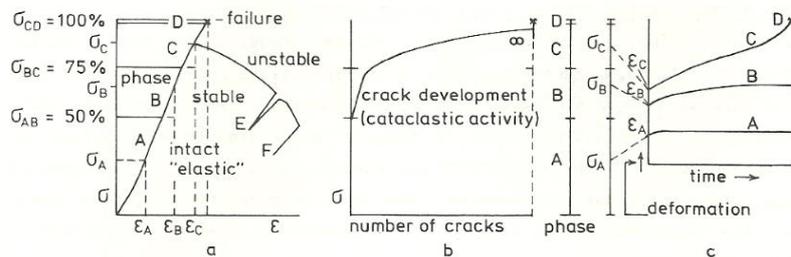


Figura 19 - a) Diagrama tensão extensão típico; b) Desenvolvimento da fissuração; c) Deformação em tensão constante no tempo [6]

A imagem anterior (Figura 19) representa o diagrama tensão-extensão típico de uma rocha e apresenta o processo de destruição em várias fases distintas em que A, B e C correspondem a 3 fases do carregamento e a fase D corresponde à rotura. A fase A também chamada de fase intacta corresponde à deformação elástica que em média atinge os 50% da tensão de rotura mas pode chegar aos 70%. Durante esta fase o provete sofre redução de vazios e pode sofrer microfissuração [5] [17]. Devido a isso este troço inicial é curvo e com concavidade no sentido das tensões crescentes, mas pouco visível em granitos de alta resistência [7]. Segue-se a fase B que é ainda uma fase estável apesar de surgirem as primeiras fissuras internas que não progredirão caso se mantenha a carga constante. O material é estável a esse nível de tensão e em níveis superiores continua a comportar-se de forma elástica. Apesar disso os valores do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson mudam devido ao rearranjo estrutural, que já vem acontecendo desde a fase A. Esta fase pode atingir os 75% da tensão de rotura. A fase

C é uma fase instável em que uma carga constante não implica que as fissuras não progridem de tal forma que a longo prazo o material irá atingir a rotura. Embora o material esteja estruturalmente muito alterado ainda é quase sólido e elástico mas com Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson reduzidos. Nesta fase ao diminuir a carga é possível na mesma atingir o equilíbrio apesar de todas as fissuras já formadas (ponto E e F). No final surge a fase D que corresponde ao momento da rotura (incluindo na fase C apenas a formação de fissuras) em que surge o fenómeno secundário [6].

Vários autores descrevem a rotura do granito como sendo provocada por uma superfície inclinada devida a esforços de corte. Na realidade a rotura por corte é uma consequência ou seja um fenómeno secundário da rotura [6] (Figura 20).

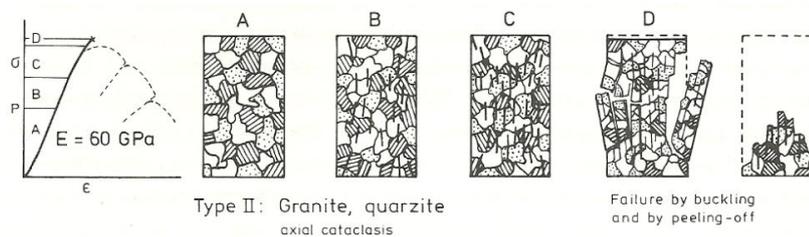


Figura 20 - Fases de rotura do granito

O fenómeno principal é a formação de micro-pilares no granito devido à formação de várias fissuras orientadas segundo a direcção de aplicação do carregamento que ao aumentar gera cada vez mais fissuras e depois surgirá o fenómeno secundário na fase D (Figura 20). Este fenómeno pode acontecer de duas formas que são a rotura dos micropilares por encurvadura ou por corte devido à destruição do material com comportamento granular. Na rotura por encurvadura ocorre a flexão dos micro-pilares formados anteriormente que pode acontecer de forma gradual ou de forma explosiva quando ocorre em apenas um momento. A rotura por corte acontece quando nas fases B e C o material é muito afectado e a fase D terá o comportamento de corte pois a nível estrutural a rocha já não é um sólido mas sim uma estrutura granular solta [6].

A característica que torna este granito mais resistente é a dimensão do grão. A dimensão do grão não tem influência no início do processo de fissuração mas é influente na propagação de fissuras. Os grãos maiores têm mais contactos e maiores fronteiras que representam um maior número de pontos de fraqueza, promovendo uma destruição mais rápida assim que as várias fissuras se juntam [16]. O grão mais fino implica uma propagação de fissuras em tensões mais elevadas já que a propagação é mais limitada ao contrário do grão grosso onde a propagação de uma fissura liberta mais energética cinética. A dimensão do grão é condicionante na questão da junção das fissuras pois em grão maior as fissuras estão mais afastadas. Apesar disso estas fissuras irão juntar-se mais cedo e a resistência da rocha irá diminuir devido a isso.

O processo de fissuração inicia nas fronteiras dos grãos e posteriormente no interior dos minerais mais fracos, entre planos de clivagem ou em pontos onde minerais mais duros aplicam uma carga pontual nos minerais mais moles. As primeiras fissuras detectáveis são intergranulares (começam nas fronteiras) e também interiores ao Feldspato sendo surgem posteriormente em níveis de tensão mais elevados fissuras no interior do Quartzo (Figura 21).

A resistência dos minerais é o segundo factor mais importante na iniciação da fissuração. Como o Quartzo e o Feldspato possuem diferentes módulos de elasticidade a sua resposta a uma solitação é diferente e isso gera tracções entre os dois minerais na sua fronteira. Em observações com SEM [1] (Figura 21) visualizou que 50% das fissuras surgem nas fronteiras entre os minerais de Feldspato e Quartzo e as restantes no interior do Feldspato. São as fronteiras dos grãos e a clivagem do Feldspato que actuam como um controlador primário da propagação de fissuras.

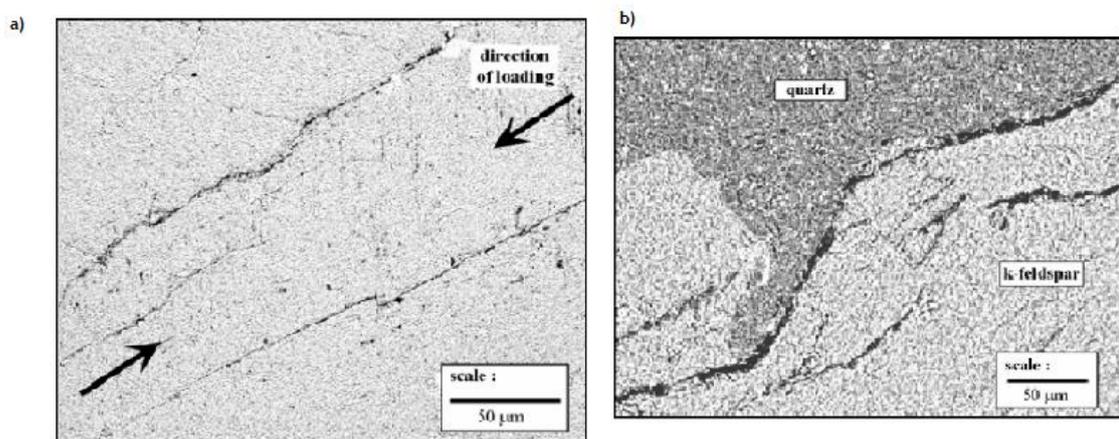


Figura 21 - a) Imagem SEM de fissura no interior do Feldspato; b) fronteira Quartzo - Feldspato [1]

### 4.3. Tecnologias de corte

As rochas ornamentais são submetidas a um processo de tratamento industrial que pode ser definido como um ciclo de produção [28]. Este ciclo de produção pode ser dividido em 3 fases distintas:

- Extracção;
- Preparação do bloco;
- Acabamento final.

#### 4.3.1. Extracção

A extracção resume-se à remoção de material útil ou economicamente viável dos maciços rochosos. Desta acção resultam blocos de várias dimensões, mas que seguem as indicações para um melhor aproveitamento do material, em termos de tecnologia de corte nas fases

seguintes. É iniciada com a prospecção e respectiva pesquisa manual com o intuito de avaliar o potencial de aproveitamento da jazida. De seguida procede-se à lavra que pode ser realizada por meio de explosivos, perfuração contínua, cravação de cunhas, fio helicoidal diamantado, Jet-flame, cortador a corrente (serra) e jacto de água [29]. A escolha do método de lavra é feita em função do tipo de rocha, das condicionantes geométricas e das restrições operacionais de cada método. Em Portugal, segundo dados de 2001 a técnica de lavra mais utilizada é o fio diamantado (52%) seguido da utilização de explosivos (28%) [30] (Figura 22).

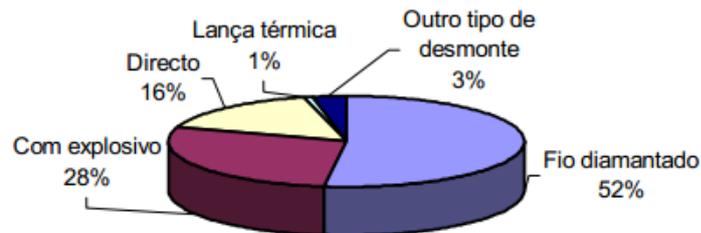


Figura 22 - Técnicas utilizadas na extração de rocha em Portugal (dados de 2001) [30]

O fio diamantado permite o corte de rochas mais duras e permite um aumento da velocidade de corte em relação aos restantes métodos. O passo inicial para a sua execução consiste na realização de dois furos (um vertical e outro horizontal) pelos quais irá passar o fio. Este fio estará ligado a uma máquina que se desloca sobre uma pista temporária para manter o cabo sobre tensão (Figura 23) [31].

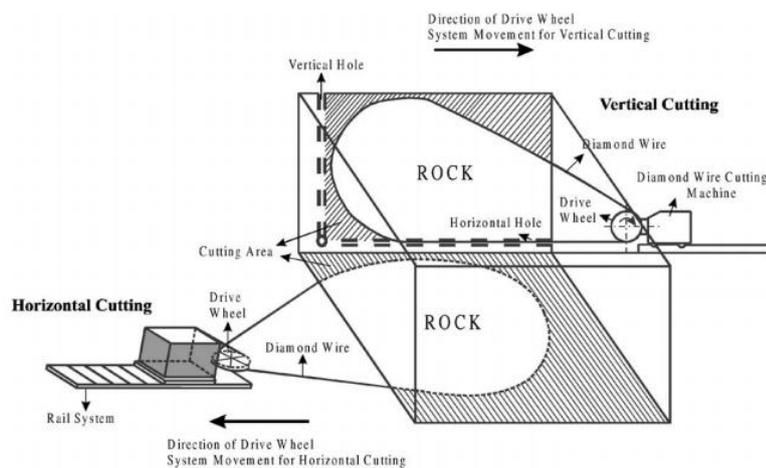


Figura 23 - Esquema de funcionamento da técnica de fio diamantado [31]

Esta técnica permite também fazer a regularização da superfície dos blocos. A utilização de explosivos é cada vez menos frequente pois origina microfracturação e desperdícios de rocha. São colocados explosivos próximos de forma a gerar um plano de corte. Os explosivos são de dosagem baixa para provocar a fissuração da rocha apenas entre os furos. De seguida apresenta-se um quadro comparativo dos vários métodos quando utilizados na lavra do granito (Tabela 7).

Tabela 7 - Comparação entre técnicas de lavra [29]

	Parâmetros Técnicos					
	Explosivos	Fio Helicoidal	Fio Diamantado	Cortador à corrente	Perfuração contínua	Cunha metálica
Velocidade de corte (m <sup>2</sup> /h)	-	1 - 2	3 - 4	1 - 3	-	-
Largura de corte (mm)	-	80 - 100	11 - 12	30 - 50	-	-
Rugosidade (cm)	5 - 8	4 - 6	2 - 4	1 - 2	2 - 3	4 - 8
Espessura da zona desperdício (cm)	5 - 10	10 - 20	-	-	-	-
Dedução comercial (cm)	10 - 18	14 - 26	2 - 4	1 - 2	2 - 3	4 - 8
Custo de corte unitário (US dólar /m <sup>2</sup> )	20 - 25	30 - 40	18 - 24	23 - 32	28 - 38	19 - 24

Finalmente como última operação da extracção faz-se a recuperação da área degradada.

#### 4.3.2. Preparação do bloco

A preparação do bloco é a fase em que se faz a serragem primária do bloco. Os blocos são cortados com espessuras bastante próximas das finais. Os principais equipamentos utilizados nesta fase são os teares, os talha-blocos de disco e máquinas de corte a fio diamantado. Os teares são equipamentos que possuem um quadro porta lâminas que estão tensionadas de forma a manter o paralelismo. A velocidade de corte depende da dureza do material, mas em geral para os granitos é de 4 cm/h [28]. As lâminas são em geral de “aço carbono” e possuem espessura entre os 3,6 e 6mm. Quanto maior a espessura maior a sua capacidade de movimentar a polpa abrasiva e maior a sua duração.



Figura 24 - Tear multi-lâminas (adaptado de [28])

As lâminas têm resistência média à tração de 7000 a 9000 MPa, quando para uso em granitos. A perda de rigidez das lâminas (devido ao desgaste) pode originar desvios no corte, originando elementos defeituosos. Neste processo é utilizada uma polpa abrasiva que é composta por água, gralha abrasiva (esférica ou angulosa) (Figura 25) e fragmentos da rocha. Possui ainda na mistura cal para evitar a oxidação da gralha durante o processo. A eficiência da serragem está directamente ligada à composição e concentração da polpa. Acaba por ser a gralha abrasiva o verdadeiro elemento de corte, enquanto as lâminas têm função de a conduzir.

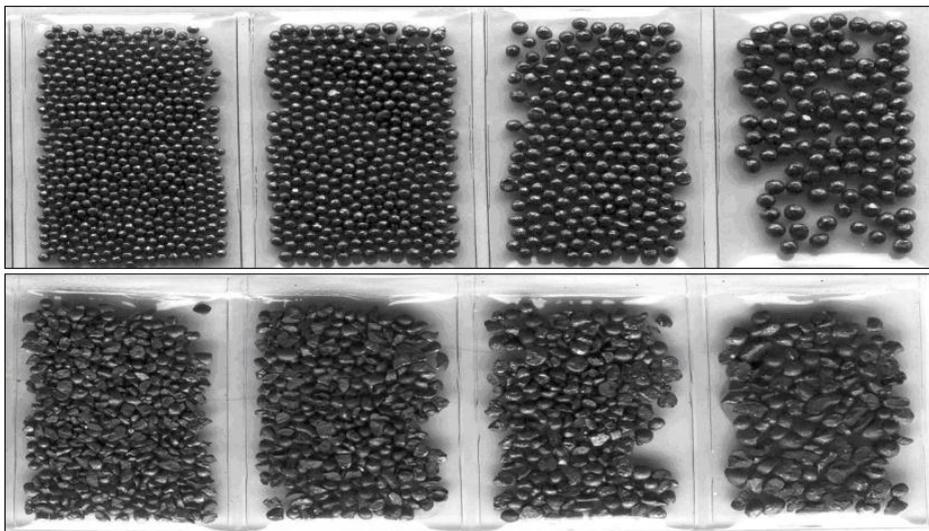


Figura 25 - Gralha esférica e angulosa [28]

A serrabilidade dos granitos é claramente dependente da sua compacidade e do seu estado de conservação. Granitos mais porosos ou mais degradados são mais fáceis de serrar. Outra variável que facilita o processo é a existência de microfissuras no interior dos cristais, e a dureza dos mesmos.

O corte com talha-blocos (Figura 26) permite o desdobramento dos blocos e pode ser feito de vários ângulos e de diferentes formas. Comparativamente aos teares, estes equipamentos possuem uma produtividade 10% superior. Os discos possuem dimensões elevadas (350 a 500 cm). Neste processo o disco permanece fixo e é o bloco que se movimenta de forma lenta. Quando montados em estruturas totalmente metálicas a sua estabilidade é superior e produzem uma superfície muito regular. Este equipamento tem algumas desvantagens que podem produzir defeitos como as vibrações do disco, o desgaste prematuro do diamante presente nos dentes dos discos e o empeno dos mesmos.



Figura 26 - Talha - blocos monodisco (adaptado de [28])

Por últimos temos o corte por fio diamantado (Figura 27). Esta técnica permite um tempo de corte inferior comparativamente aos outros métodos independentemente da dureza e serrabilidade da rocha. De salientar que em muitos casos a utilização desta técnica permite dispensar a operação de amaciamento da superfície. Fisicamente, o corte dá-se por abrasão da superfície devida à acção de anéis ou pérolas com grãos de diamante, dispostos ao longo do fio que é traccionado e tem uma determinada velocidade. O fio diamantado é constituído por um cabo de aço galvanizado de 5mm de diâmetro que funciona como suporte para as pérolas diamantadas [29] que são separadas umas das outras por molas. O fio pode atingir um comprimento entre 50 a 70 m.



Figura 27 - Fio diamantado de mola [29]

Usualmente os fios têm, quando para utilização em granitos 39 a 41 pérolas/metro. As pérolas diamantadas são constituídas por um anel que possui uma pasta diamantada (uma liga metálica e grãos de diamante). Estas pérolas têm diâmetros que rondam os 10mm. Como se sabe o diamante é o mineral mais duro (10 na escala de Mohs) e por isso tem capacidade para cortar todos os minerais presentes no granito. As pérolas são separadas ao longo do cabo por molas metálicas (para utilização em mármore) ou por material plástico ou borracha (para granitos por exemplo). Estas são constituídas por um anel metálico que possui uma pasta diamantada (liga metálica e grãos de diamante). O diâmetro externo da pérola varia de 10,0 mm até 11,5mm e tem de comprimento 6mm [29].

Existem 3 tipos de fio diamantado que são escolhidos em função do seu uso previsto: fio com mola, fio com plástico e fio vulcanizado. Os fios com mola foram os primeiros a surgir. São constituídos por um cabo de aço pérolas e molas metálicas que mantinham o espaçamento entre as pérolas e absorviam choques do fio contra a rocha. A sua utilização começou a diminuir pois como não possuíam revestimento o cabo de aço sofria deterioração. Para contrariar esta situação surgiram os cabos revestidos com plástico ou borracha que era injectada para preencher os espaços entre os anéis.

#### 4.3.2.1. Mecanismo de corte e desgaste

As técnicas de corte funcionam segundo dois métodos [32] dentes e penetradores. Os dentes atacam a rocha à medida que se movem na direcção paralela à superfície (Figura 28) ao contrário dos penetradores que actuam pressionando a superfície no sentido perpendicular a esta.

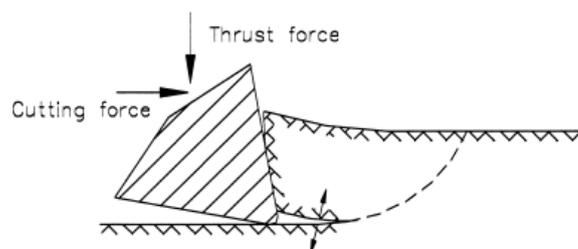


Figura 28 - Modelo físico do processo de corte [32]

A maioria das rochas à temperatura ambiente responde de forma elasto-plástica, o que faz com que a ferramenta de corte provoque fissuras devidas à tracção que se propagam produzindo fragmentos ou lascas. Isto acontece nos dentes devido à sua ponta afiada que induz tracções de forma directa. Nos penetradores as forças de tracção surgem com a aplicação de compressão na direcção perpendicular à superfície, formando uma zona de esmagamento sob a ferramenta. Normalmente as ferramentas dentadas (discos diamantados por exemplo) são apenas aplicadas no corte de rochas de fraca a média resistência, visto que

os dentes são mais susceptíveis ao desgaste e à rotura que os penetradores. No corte de rochas duras os dentes estão sujeitos a esforços de flexão podendo estes partir de forma abrupta.

A rigidez dos materiais é inversamente proporcional à temperatura. Grande parte da energia é dissipada em calor durante o processo de corte e é dirigida para a rocha e para a ferramenta de corte. O aquecimento da ferramenta leva a que esta perca rigidez acelerando o desgaste. Este fenómeno é importante no corte com ferramentas dentadas, uma vez que nos penetradores a temperatura gerada é muito inferior.

A técnica de fio diamantado funciona como um desgaste do tipo abrasivo (Figura 29) a dois corpos que tem um melhor rendimento e da qual se obtêm superfícies mais lisas, quando comparada com técnicas que utilizam abrasivos soltos (abrasão a três corpos). A rugosidade média é em norma 1/5 a 1/10 da obtida por abrasão a três corpos.

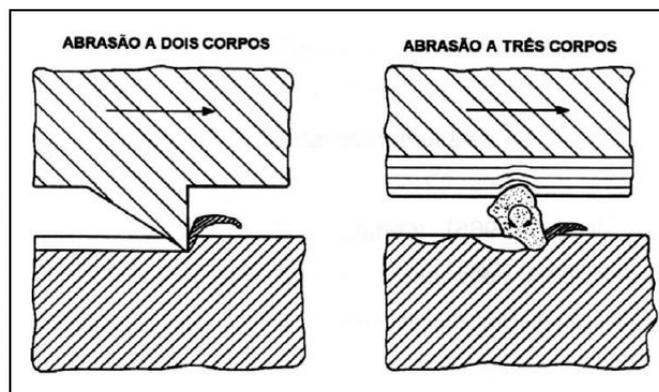


Figura 29 - Tipos de abrasão [29]

O desgaste aumenta com a energia de corte necessária e pode levar à fracturação dos diamantes. No caso das serras/discos circulares indicam-se na Tabela 7 [33] os principais factores que afectam o desgaste de serras circulares.

Tabela 8 - Factores que afectam o desgaste de serras circulares [33]

Rock characteristics				Saw operating characteristics	Saw design	Temperature	Machine	Fluid	Other
Textural	Mechanical	Structural	Weathered						
Grain size	Strength	Joints	Alteration	Force or load	Cutting mechanism	Thermal shock	Power	Flow rate	Operator skill
Grain shape	Hardness	Fractures	Water content	Cutting speed	Cutting mode	Thermal fatigue	Vibration		Environment
Mineral type and content	Abrasiveness	Cleavage		(Feed rate)	Diamond properties				Climate
Matrix type and content	Pore pressure	Foliation		Specific removal rate	Matrix properties				
Degree and type of cementation		Fabric		Peripheral speed	Segment exposure				
Bonding structure		Orientation		Depth of cut, specific energy	Segment density, saw profile, saw hydraulic, manufacturing				

Na tecnologia de serras/discos diamantados o mecanismo de corte resume-se à formação de lascas. Os diamantes removem o material raspando e fracturando a superfície (Figura 29). O desgaste associado à tecnologia de disco diamantado pode ser de vários tipos e ter várias origens, sendo a mais comum a abrasão (Tabela 9).

Tabela 9 - Tipos de desgaste [33]

Type of wear	Type of contact	Motion	Wear mechanism
Abrasive	Elastic/plastic	Sliding	Abrasion
Adhesive	Elastic/plastic	Sliding	Adhesion
Erosive	Elastic/plastic	Impact/sliding	Abrasion
Fretting	Elastic/plastic	Oscillating	Adhesion, abrasion
Fatigue	Elastic/plastic	Rolling	Fatigue
Corrosive and diffusion	Electrolytic	Electrochemical	Chemical reaction

O desgaste ocorre a nível microscópico devido ao choque nos diamantes individualmente. No impacto com partículas de rocha alguns cristais fissuram e a superfície do diamante vai sendo removida, sendo a velocidade de progressão deste fenómeno dependente da diferença de dureza entre os materiais [33].

Como referido anteriormente, os diamantes são colocados na ferramenta de corte através de uma pasta que funciona como matriz, ou seja, tem função de fixar os diamantes. A matriz e o diamante têm desgaste bastante diferente e para que o corte seja eficiente ambos devem desgastar-se de igual forma. Os diamantes mantêm-se afiados mesmo com o desgaste, produzindo concentração de tensões nos mesmos. Estes são mais “frágeis” que a matriz e sozinhos não conseguem suportar as tensões de tracção e corte durante o processo. Devido a isso e á corrosão da matriz os diamantes podem soltar-se. Se tal acontece muito cedo, o buraco que se forma leva a um desgaste muito rápido.

A abrasividade da rocha tem importância relevante. O desenvolvimento de áreas planas nas superfícies de corte aumenta a área de contacto que aumenta a força necessária para manter a taxa de corte. Os minerais de sílica são os mais abrasivos e devido a isso, quanto mais minerais deste grupo a rocha possuir, mais abrasiva será e maior o desgaste da ferramenta de corte [33].

A rugosidade resultante do processo de corte depende também da velocidade. À medida que aumenta, a rugosidade da superfície diminui. Segundo [34] a *feed rate* (velocidade de corte) tem grande influência na qualidade da superfície, já que quanto menor o *feed rate*, menores as forças de corte e menores vibrações, resultando daí um melhor acabamento. Daqui se conclui que o aumento das velocidades de corte associa-se a uma diminuição das forças de corte. O mesmo autor conclui que a profundidade de corte é pouco relevante para a qualidade final da superfície.

### 4.3.3. Acabamento final

A última fase do ciclo de produção que falta referir é o beneficiamento final. Aqui o objectivo é dar a forma e dimensões finais ao produto final. Com esta fase temos o acabamento final,

que pode ser definido pelo brilho, textura, a aparência do material e a qualidade do corte, principalmente das arestas. As superfícies podem ser acabadas do seguinte modo: polimento e amaciamento. Tanto o polimento como o amaciamento consistem simplesmente na diminuição da rugosidade. Para tal utilizam-se elementos abrasivos que desbastam o material devido ao seu movimento até se atingir o grau de polimento desejável, utilizando abrasivos de granulometria decrescente. Durante todo o processo é utilizada água. Este processo é muito influenciado pelas seguintes variáveis [28]:

- Pressão de trabalho;
- Velocidade de rotação/translação (tempo de polimento);
- Caudal de água;
- Qualidade dos elementos abrasivos.

O abrasivo mais comum é o carbetto de silício (*siliciumcarbid*). O processo de polimento é dividido em duas fases que são o amaciamento e o polimento propriamente dito. O amaciamento consiste na remoção de rugosidades mais elevadas, geradas pelo processo de corte no beneficiamento primário [28] para daqui resultar uma superfície mais uniforme e espessura mais regular. Visualmente a superfície resultante apresenta uma cor mais definida, mas mantém um brilho opaco.

O polimento em si tem como objectivo remover as rugosidades mais pequenas, ou seja um amaciamento mais aprofundado. Assim são removidos os poros da superfície e obtém-se um nível de brilho superior. Ambas as operações são realizadas com equipamentos de polimento, que podem ser operadas manualmente ou de forma automática. Existem actualmente três tipos de máquinas polidoras: Manuais de bancada fixa, de ponte móvel com bancada fixa e multicabeças com tapete transportador.

Nas polidoras manuais, todo o processo depende do operador que regula a pressão do cabeçote e a sua trajectória. Devido a isso podem ocorrer muitas imperfeições e a qualidade do produto pode ser baixa. Ainda assim, operadores experientes podem conseguir resultados de qualidade superior a processos automatizados. No caso de granitos é possível polir cerca de 1 a 2 m<sup>2</sup>/h.

As máquinas polidoras de bancada fixa são equipamentos que fazem o polimento através de um movimento de vai e vêm da ponte sobre a bancada, ponte esta que possui em si o motor e o conjunto polidor. Este movimento de vai e vêm é completado pelo movimento transversal do conjunto polidor que tem movimento de rotação. O polimento é feito recorrendo a abrasivos de diferentes granulometrias, diminuindo até se atingir o nível de polimento desejado.

As máquinas polidoras de tapete transportador (Figura 30) consistem numa esteira de borracha onde as peças a trabalhar são colocadas e transportadas. Como no método anterior existe um conjunto polidor que realiza um movimento transversal sobre a mesa. Assim o

movimento da esteira e do conjunto permite realizar o polimento em toda a superfície. São também usados neste método abrasivos de granulometria decrescente consoante o grau de polimento que se atinge. É o método mais indicado quando se pretende atingir alta qualidade de acabamento e uniformidade do lustro.



Figura 30 - Polidora de tapete transportador [28]

#### 4.4. Parâmetros caracterizadores da rugosidade

A rugosidade pode ser representada matematicamente através de vários parâmetros, que se podem agrupar em 3 grupos [35]:

- Parâmetros de amplitude;
- Parâmetros de espaçamento;
- Parâmetros híbridos.

Os parâmetros mais importantes para caracterizar uma superfície são os parâmetros de amplitude, sendo dentro deste grupo a rugosidade média o mais universal para o controlo de qualidade. Neste trabalho calcularam-se alguns destes parâmetros que se pensam suficientes para fazer uma caracterização da superfície, de entre um total de 59 existentes [35]. Outros estudos de avaliação da rugosidade da superfície de granitos [14] foram realizados com base nestes parâmetros, recorrendo apenas ao cálculo da rugosidade média e amplitude máxima de rugosidade. A caracterização da rugosidade é feita segundo um perfil, com um determinado comprimento como se de uma amostra se trata-se. Deve por isso realizar mais do que um perfil e comparar os resultados obtidos. A dimensão do comprimento de avaliação é dependente da capacidade de memória e processamento do aparelho de medição (Figura 31).

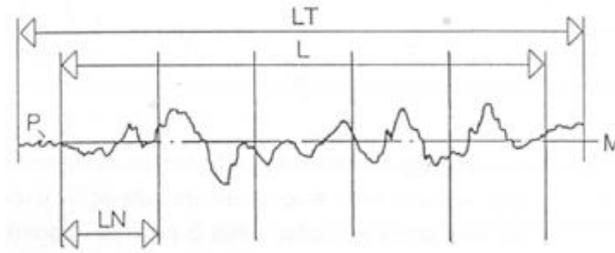


Figura 31 - Caracterização da rugosidade: L - comprimento de avaliação, P - Perfil; M - linha média; Ln - comprimento da amostra; Lt - comprimento total

A rugosidade média ( $R_a$ ) (Figura 32) é também conhecida como método da linha média e como referido anteriormente é o mais utilizado no controlo de qualidade de superfícies. É definido como a média dos desvios das irregularidades da rugosidade a partir da linha média, tendo em conta um determinado comprimento de amostra. É um parâmetro de fácil obtenção e dá uma boa descrição das variações de altura dos picos e vales do perfil [35]. Apesar disso não dá qualquer informação sobre o “comprimento de onda” e não é sensível a pequenas mudanças no perfil. Matematicamente representa-se da seguinte forma (equação 4.1):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4.1)$$

Esta função é equivalente a um rectângulo de comprimento L e cuja área representa o somatório das áreas fechadas entre o perfil e a linha média.

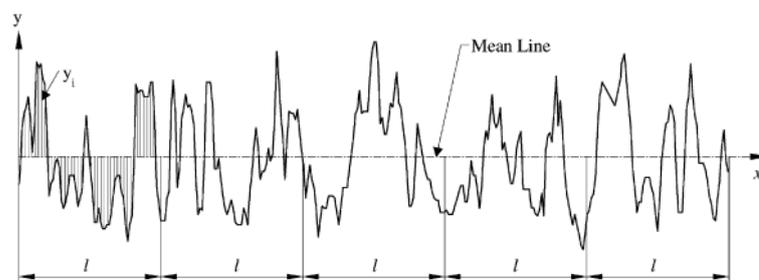


Figura 32 - Definição de rugosidade média ( $R_a$ ) [35]

A rugosidade média quadrática ( $R_q$ ) (Figura 33) representa o desvio padrão da distribuição das elevações das superfícies. É um parâmetro mais sensível do que a rugosidade média a grandes desvios da linha média. A linha média deste método é a linha que divide o perfil para que a soma dos quadrados dos desvios do perfil seja igual a zero (equação 4.2).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4.2)$$

Também mais sensível a picos e vales ocasionais é o parâmetro dos 10 pontos ( $R_z$ ) e pode ser definido de 2 formas (Figura 33). As normas ISO definem como a diferença na altura entre a média dos 5 picos mais altos e os 5 vales mais baixos (equação 4.3), enquanto as normas DIN definem como a média do somatório dos 5 picos mais altos e os 5 vales mais baixos (equação 4.4). Nas equações  $n$  representa o número de amostras,  $p_i$  o valor do pico e  $v_i$  o valor do vale.

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i) \quad (4.3)$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} (\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i) \quad (4.4)$$

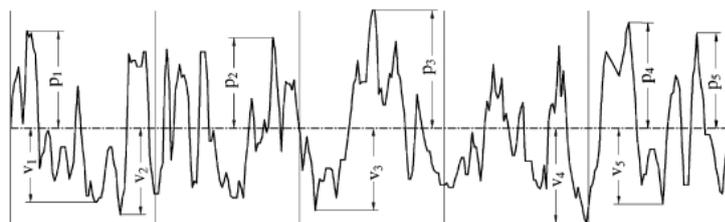


Figura 33 - Representação do parâmetro dos 10 pontos [35]

Parâmetro semelhante ao anterior é a altura máxima dos picos ( $R_p$ ) (Figura 34) que é complementado pelo parâmetro altura média dos picos ( $R_{pm}$ ) que é representado por (equação 4.5):

$$R_{pm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{p_i} \quad (4.5)$$

De forma análoga, os dois parâmetros anteriores podem ser utilizados para os vales do perfil, designando-se de altura máxima dos vales ( $R_v$ ) (Figura 34) e altura média dos vales ( $R_{vm}$ ), onde  $n$  representa o número de amostras (equação 4.6).

$$R_{vm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{p_{v_i}} \quad (4.6)$$

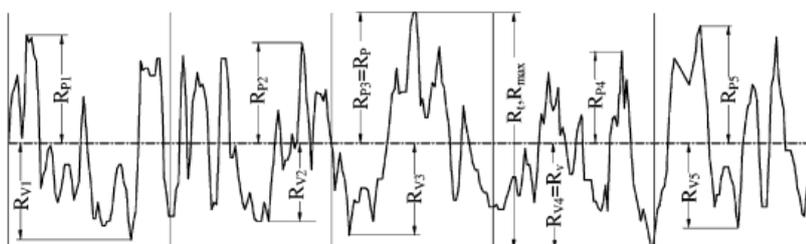


Figura 34 - Definição dos parâmetros  $R_p$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_v$ ,  $R_{vm}$ ,  $R_t$  [35]

A altura máxima do perfil ou máxima altura pico-vale ( $R_t$ ) (Figura 34) é um parâmetro muito sensível a grandes desvios e define-se como a distância entre o pico mais alto e a vale mais

baixo.

Apesar destes parâmetros permitirem identificar as características de uma superfície, estes não são suficientes para distinguir perfis diferentes porque vários perfis distintos podem ter os mesmos valores de rugosidade. Existe por isso um parâmetro denominado de *skewness* ( $R_{sk}$ ) (obliquidade em Português), que é utilizado para medir a simetria do perfil sobre a linha média (Figura 35). É um parâmetro sensível a vales e picos ocasionais. Uma distribuição simétrica das alturas tem ondulação zero. Perfis que registem arranhões profundos ou sem picos têm obliquidade negativa. Matematicamente define-se da seguinte forma:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} y^3 p(y) dy = \frac{1}{NR_q^3} (\sum_{i=1}^n Y_i^3) \quad (4.7)$$

Na equação 4.7  $N$  representa o número de pontos,  $R_q$  representa a média quadrática da rugosidade e  $Y_i$  representa a altura do perfil no ponto  $i$ .

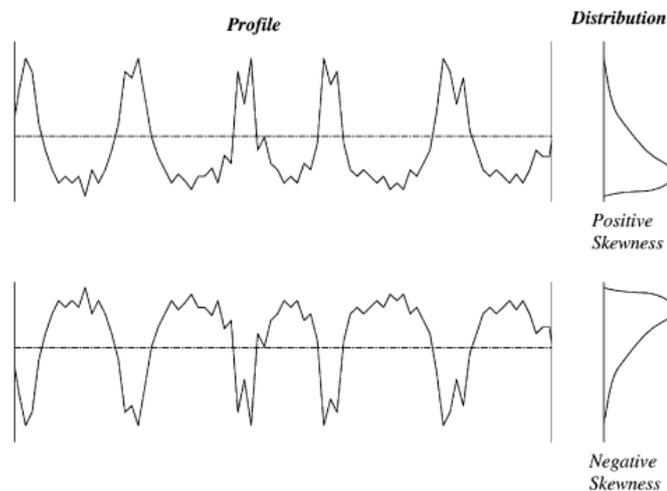


Figura 35 - Definição de obliquidade [35]

O parâmetro ADF (*amplitude density function*) representa o histograma da distribuição dos picos do perfil e é definido por (equação 4.9):

$$ADF(y) = \sqrt{2\pi R_q^2} \times e^{\frac{-y^2}{2R_q^2}} \quad (4.9)$$

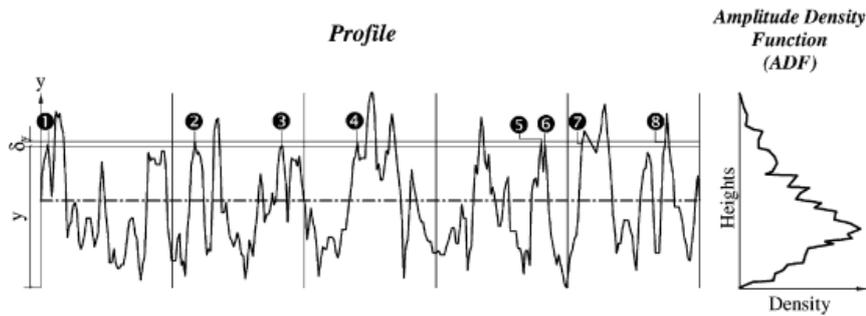


Figura 36 - Parâmetro ADF [35]

O segundo grupo de parâmetros é referente aos parâmetros de espaçamento que tem como função medir as características horizontais do perfil. Um dos mais importantes é o espaçamento de picos (*peak spacing*), bastante importante em superfícies friccionais.

Como parâmetro mais imediato existe a média do espaçamento entre picos adjacentes ( $S$ ) que é definido como o nome indica como o espaçamento médio de picos locais adjacentes ao longo do comprimento de amostragem (equação 4.10). O pico local é definido como a parte mais alta do perfil medido entre dois mínimos e só é contabilizado se a distância vertical entre os picos adjacentes for superior a 10% de  $R_t$  (Figura 37).

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.10)$$

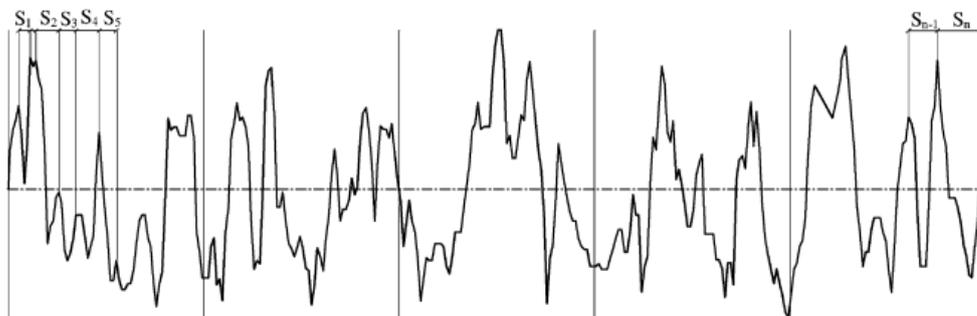


Figura 37 - Definição de  $S$  [35]

Semelhante a este existe o parâmetro espaçamento médio em relação à linha média ( $S_m$ ), que segue os mesmos princípios do parâmetro anterior mas cuja medição da distância se faz sobre a linha média (Figura 38). O pico é o ponto mais alto do perfil entre troços ascendentes e descendentes cruzando a linha média.

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.11)$$

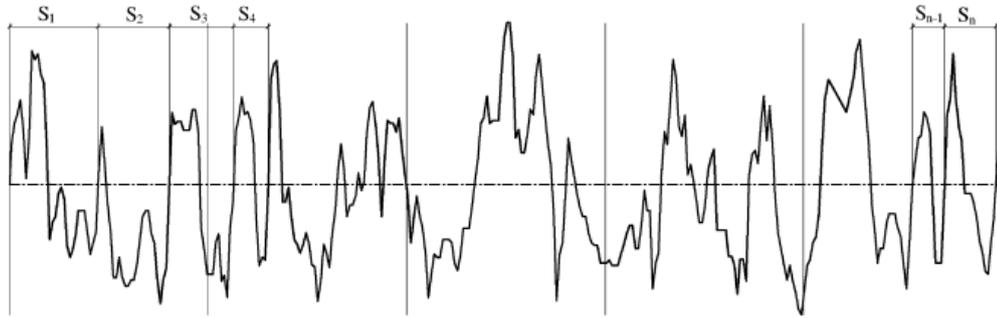


Figura 38 - Definição de  $S_m$  [35]

Com o mesmo objectivo mas de princípio diferente existe o parâmetro “número de intersecções do perfil com a linha média  $n(0)$ ”, que calcula o número de intersecções do perfil com a linha média em cada centímetro de perfil (Figura 39). Matematicamente (equação 4.12):

$$n(0) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n c_i \quad (4.12)$$

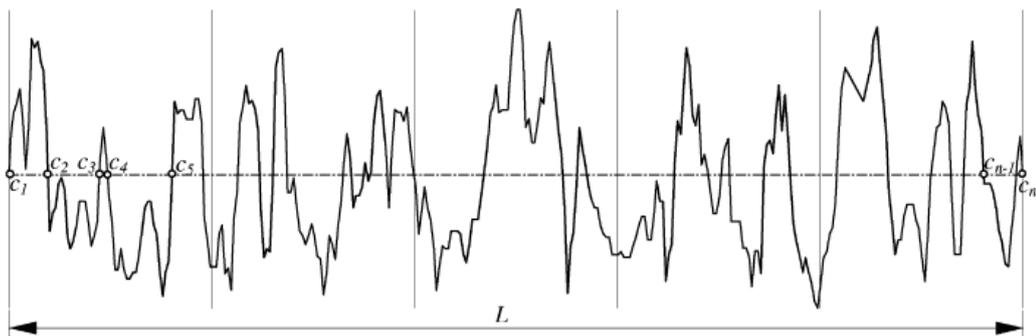


Figura 39 - Definição de  $n(0)$  [35]

O último grupo de parâmetros são os parâmetros híbridos. Estes resultam da combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento. O mais conhecido e mais utilizado é o “factor de andamento do perfil” (*stepness factor of the profile*) ( $S_f$ ), definido matematicamente pela razão entre a rugosidade média ( $R_a$ ) e a o espaçamento médio dos picos ( $S_m$ ) (equação 4.13).

$$S_f = \frac{R_a}{S_m} \quad (4.13)$$



# Capítulo 5

## Análise Numérica

### 5.1. Programa de cálculo automático

Toda a análise numérica foi realizada aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF) com recurso ao software LUSAS FEA v13.6 [36]. Foram considerados modelos de parede (estado plano de tensão) considerando o material com comportamento elástico e linear. O tipo de elemento utilizado é descrito em [36] como quadrilátero de quatro nós. As malhas de elementos finitos foram geradas automaticamente com recurso a rotinas do programa [36]. Utilizaram-se elementos para tensões no plano (*2D continuum*), de forma quadrangular e com interpolação quadrática. A malha resultante é irregular (QPM8) (Figura 40).

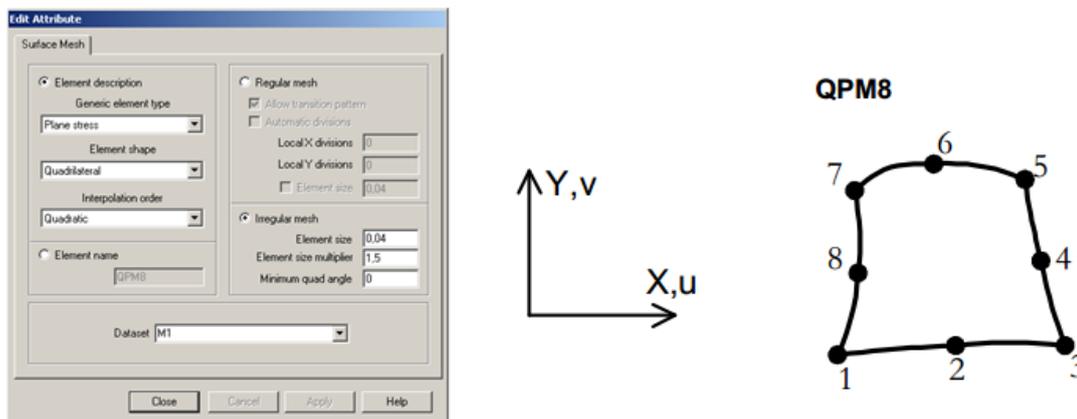


Figura 40 - Descrição do tipo de elemento

Segundo [27] o Módulo de Elasticidade (E) do Quartzo é da ordem de 90 GPa e o do Feldspato cerca de 70 GPa. Note-se que o estudo visa obter resultados que dependem da rigidez relativa dos dois minerais. Em todos os modelos o Coeficiente de Poisson foi considerado nulo. Tal opção foi tomada devido ao facto de as extensões transversais que surgem na realidade serem em grande parte devidas à abertura de fissuras e não a uma propriedade do material propriamente dito.

Foram simplificadamente considerados modelos com apenas dois minerais constituintes, desprezando os minerais presentes em menor quantidade para clareza das conclusões. Seguindo a proporção de 60% de Feldspato e 40% Quartzo conceberam-se modelos em que se aplicou também a proporção inversa para o caso de o Quartzo funcionar como matriz, representando os casos limite que enquadram todo o leque de situações reais. As proporções foram adaptadas de valores indicados por [15] [19] [16].

Em termos gerais foram considerados os seguintes parâmetros para identificar a forma como as forças são encaminhadas pelo “esqueleto” formado pelos minerais, foi considerada a influência de várias variáveis:

1. Dimensão relativa entre o grão e a matriz envolvente. Foram adoptadas três dimensões diferentes;
2. Distribuição espacial dos minerais. Foram consideradas disposições regulares de grãos, alinhados e desalinhados respectivamente, pretendendo simplificar modelar situações extremas das disposições irregulares da realidade;
3. Forma da junta considerando duas variantes, com e sem espaço vazio entre os “grãos” de Quartzo que ressaltam da superfície serrada de forma mais grosseira, representando o corte com fio diamantado e a disco respectivamente.

Os resultados da análise numérica realizada são proporcionais às dimensões absolutas dos modelos, pelo que se adoptaram valores ampliados para o diâmetro dos grãos que na realidade são da ordem de milímetros.

As dimensões geométricas dos modelos de parede foram 1 x1 x 0,20 m, ou seja a uma escala de cerca de 1000/1. A solicitação axial considerada distribuída nos topos dos modelos foi de 50 kN/m, o que corresponde a uma tensão de referência de compressão de 0,25 MPa.

## 5.2. Modelação

### 5.2.1. Modelos preliminares

Uma das primeiras dificuldades surgiu na forma como modelar geometricamente os vários minerais com o software disponível. As primeiras análises foram baseadas em formas simples de quadrados simulando os minerais, sendo a estes atribuídos módulos de elasticidade diferentes (Figuras 41 e 42).

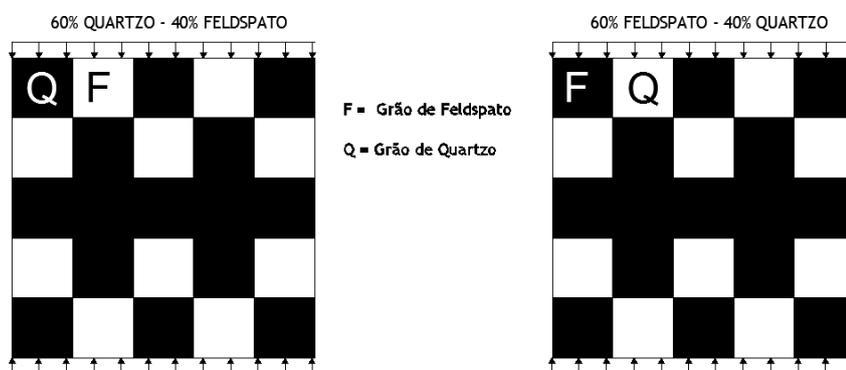


Figura 41 - Modelos preliminares

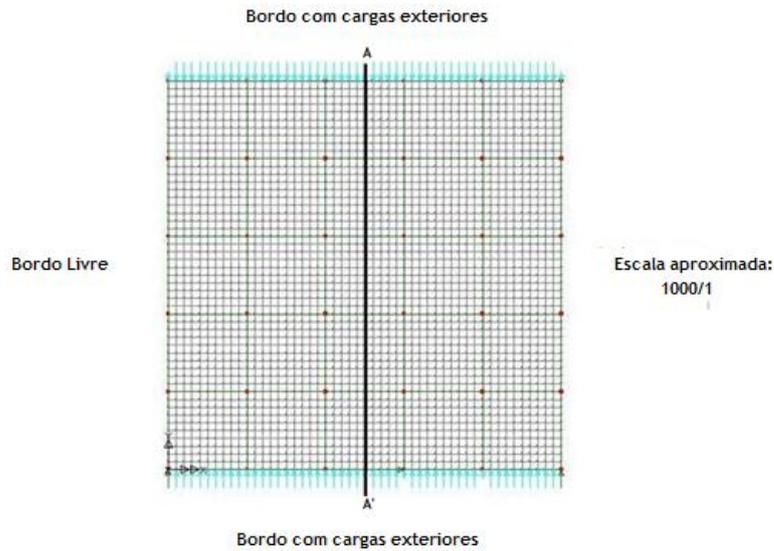


Figura 42 - Primeiro modelo de cálculo (M1)

Este primeiro modelo (Figura 42) tinha como principal inconveniente a transição entre os minerais. Nas fronteiras dos quadrados com contacto entre diferentes minerais, surgiam nós que poderiam ser caracterizados por singularidades e surgiam daí erros numéricos consideráveis. Semelhante ao que acontece na matemática com pontos singulares, o mesmo sucede neste caso em que pontos muito próximos têm tensões distintas existindo uma variação muito acentuada da tensão. Na Figura 43 apresenta-se um diagrama de tensões normais  $\sigma_x$  ao longo de uma secção vertical do modelo apresentado na Figura 42 onde se podem observar as referidas singularidades (variações elevadas de tensão).

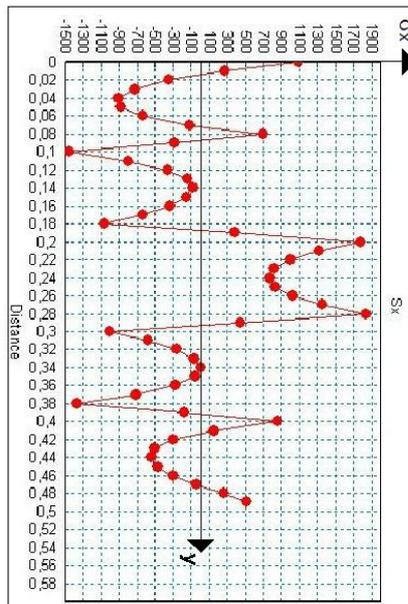


Figura 43 - Tensões  $\sigma_x$  ao longo da metade superior da secção A-A' (ver Figura 42) (Matriz de Quartzo)

O problema das singularidades foi resolvido introduzindo fileiras de Quartzo entre os minerais e modificando a forma dos minerais de Feldspato para respeitar a proporção entre eles (Figura 44).

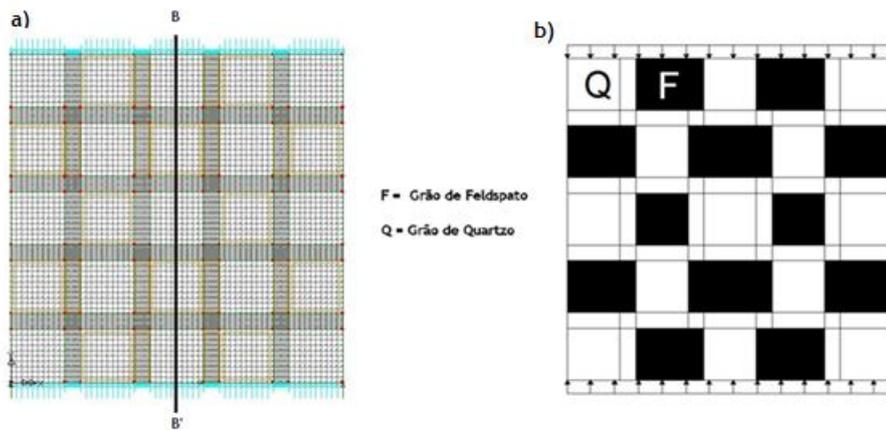


Figura 44 - Segundo modelo de cálculo (M2) - a) malha de elementos finitos; b) disposição relativa dos minerais

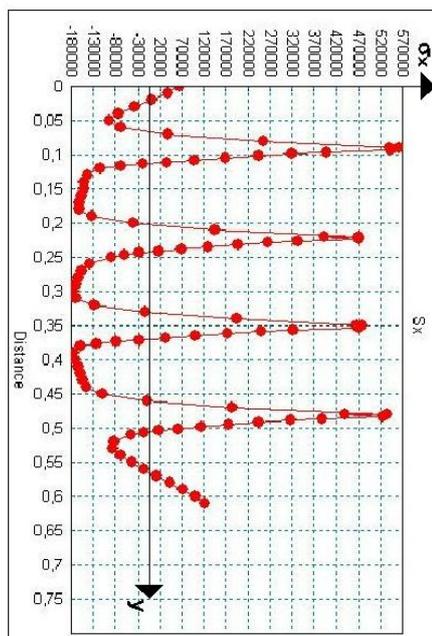


Figura 45 - Tensões  $\sigma_x$  ao longo da metade superior da secção B-B' (ver Figura 44) (Matriz de Quartzo)

Apesar do modelo M2 ser mais aproximado, não parece ainda satisfatório, pois os grãos não possuem forma rectangular nem a transição entre minerais se faz desta forma tão regular. Optou-se por isso por utilizar modelações numéricas simulando os grãos de Feldspato e Quartzo com círculos e o restante espaço ocupado pela matriz (Modelo M3 descrito no subcapítulo seguinte).

### 5.2.2. Modelos definitivos

Tendo surgido a questão de qual a influência da dimensão do grão na distribuição de tensões ao longo do modelo, foram testadas 3 hipóteses com base no mesmo esquema. Considerou-se

uma placa de 1x1x0,2m com uma matriz de Quartzo ou Feldspato no interior do qual foram introduzidos círculos com as seguintes dimensões (Figuras 46,51 e 55):

- a. Diâmetro de 0,40 m (M3A);
- b. Diâmetro de 0,60 m (M3B);
- c. Diâmetro de 0,80 m (M3C).

Em todas estas modelações foi considerada a placa isolada, com bordos laterais livres e carregamento de 50kN/m nos topos. Em primeiro lugar foi modelado um grão com diâmetro de 0,40 m. No modelo M3A o grão ocupava 13% da área da placa.

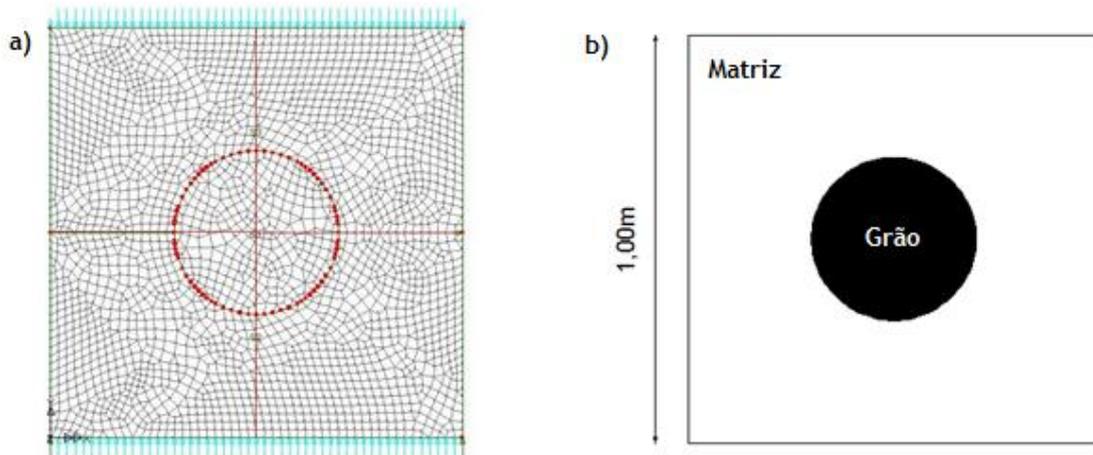


Figura 46 - Modelo de cálculo (M3A) e disposição dos minerais

## 5.3. Resultados

### 5.3.1. Influência da dimensão do grão

#### 5.3.1.1. Modelo M3A

Da análise do modelo M3A com matriz de Quartzo resultaram os seguintes diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  onde se podem reconhecer as respectivas isolinhas.

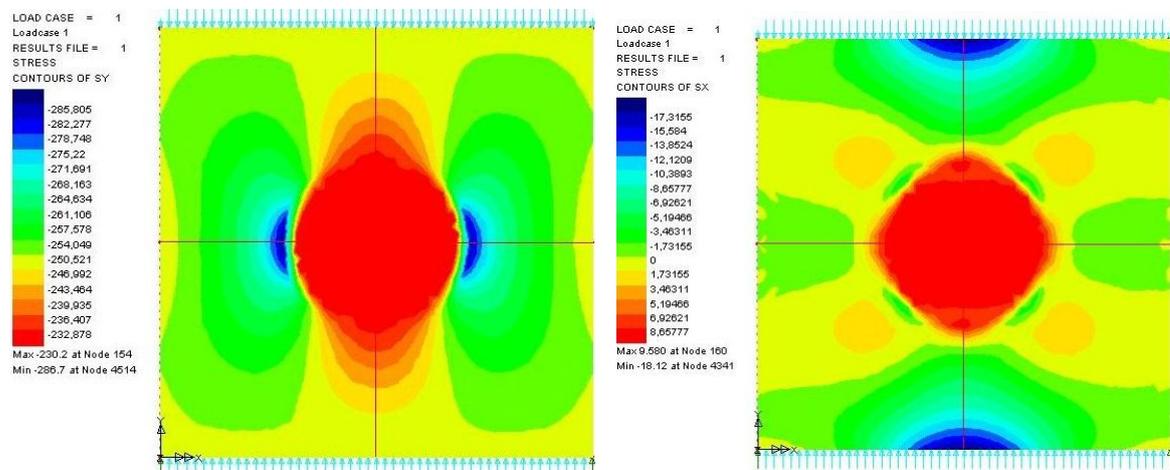


Figura 47 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M3A - Matriz de Quartzo)

Observando o diagrama de tensões da Figura 47 verifica-se que as forças seguem preferencialmente o caminho do mineral mais rígido (Quartzo) desviando-se lateralmente contornando o mineral de Feldspato. Tal desvio provoca o aparecimento de tensões transversais de tracção no interior do grão de Feldspato. Com base na análise dos diagramas de tensões segundo as duas direcções, construiu-se um modelo de escoras e tirantes, que representa o caminho da resultante das forças, sempre respeitando as condições de equilíbrio (Figura 48).

Os modelos de escoras e tirantes são determinados em primeiro lugar, através da integração numérica dos diagramas de  $\sigma_x$  ao longo de cortes da secção na direcção vertical. O valor dessa integração fornece a intensidade da resultante das tensões cuja posição é também determinada. Com estes dados obtém-se a intensidade e posição das resultantes das tensões segundo a direcção horizontal. A componente vertical do caminho das forças é obtida através da determinação da posição da resultante das tensões nos diagramas  $\sigma_y$  ao longo de secções horizontais. Outra forma de obter a posição dos nós do modelo é através das equações de equilíbrio, determinado o ângulos com a horizontal ou vertical.

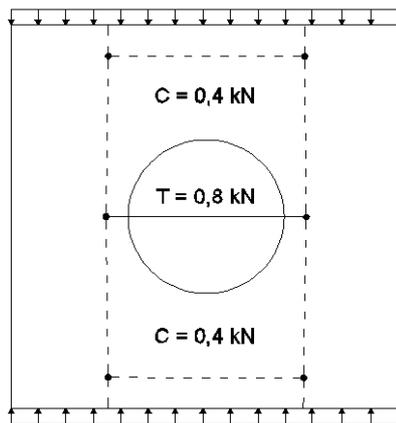


Figura 48 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3A - Matriz de Quartzo)

A resultante das compressões verticais (25kN em cada escora) sofre apenas um pequeno desvio. A resultante das tracções dentro do Feldspato é reduzida quando comparada com os 50kN que atuam no modelo. As forças verticais concentram-se especialmente no Quartzo junto à fronteira do Feldspato, sendo de menor intensidade no interior do grão de Feldspato. Quando a posição relativa dos minerais se altera passando o Feldspato a matriz, o modelo de escoras e tirantes altera-se. Onde antes existia compressão passa a existir tracção e vice-versa com as intensidades a manterem-se. As tracções passaram para fora do grão e a sua intensidade diminuiu (Figuras 49 e 50).

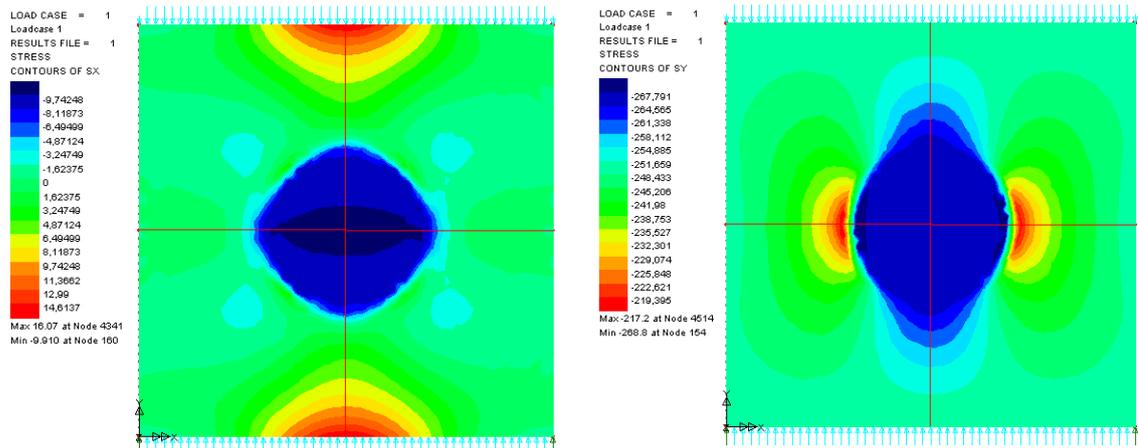


Figura 49 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M3A - Matriz Feldspato)

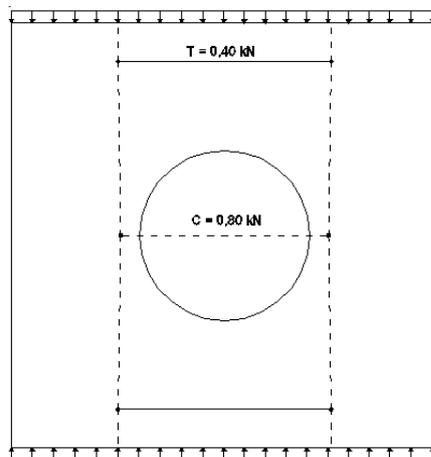


Figura 50 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3A - Matriz Feldspato)

### 5.3.1.2. Modelo M3B

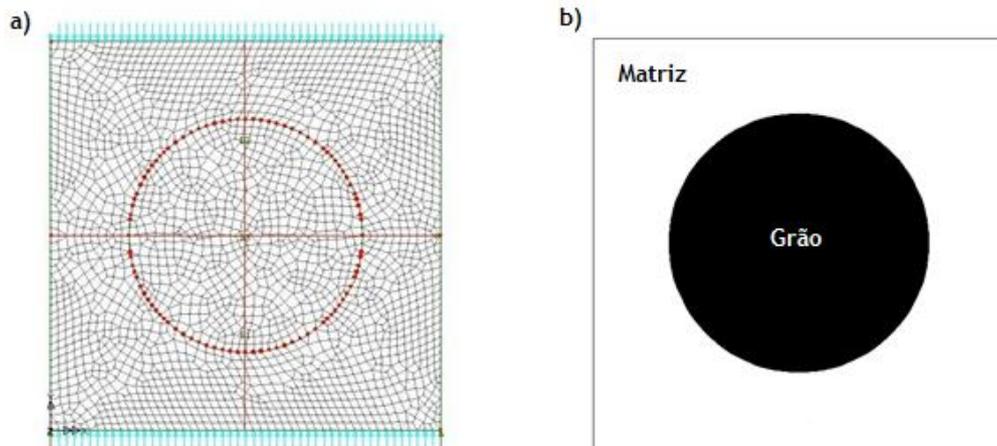


Figura 51 - Modelo de cálculo (M3B) e disposição dos minerais

A Figura 51 representa o modelo M3B com grão central de 0,60 m de diâmetro. Resultaram deste modelo os seguintes diagramas de tensões da Figura 52, com base nos quais foi construído o modelo de escoras e tirantes da Figura 53.

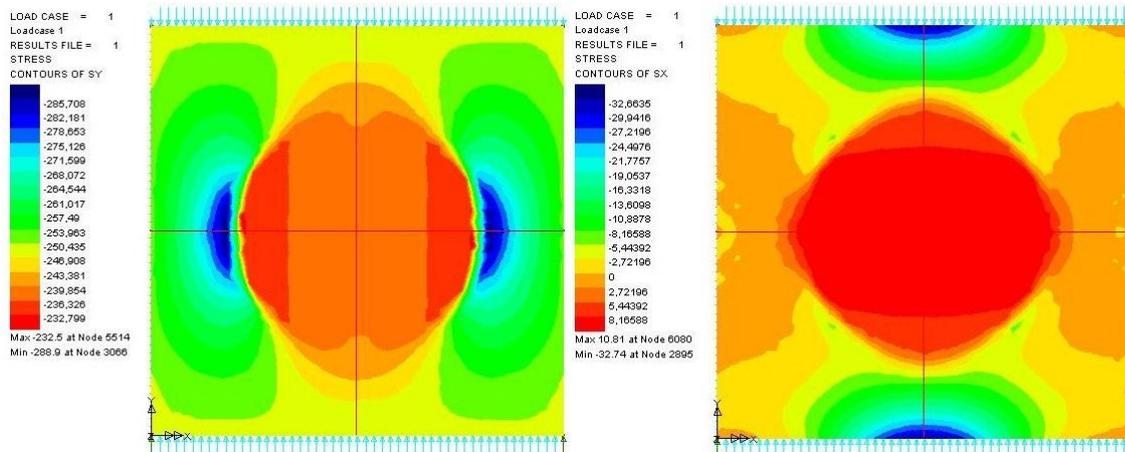


Figura 52 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M3B - Matriz de Quartzo)

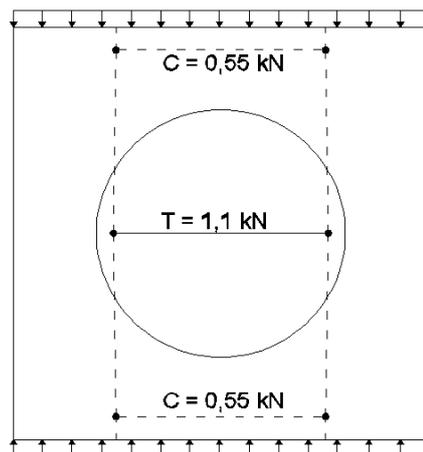


Figura 53 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3B - Matriz de Quartzo)

Verifica-se que a resultante das compressões horizontais subiu devido ao aumento da dimensão do mineral de Feldspato e a sua intensidade também. Como o grão de Feldspato é de maiores dimensões e o Quartzo é mais rígido, as forças têm de fazer um maior desvio lateral para contornar o mineral mais flexível, fazendo com que as resultantes das forças horizontais aumentem para garantir o equilíbrio. Ainda assim são relativamente pequenas quando comparadas com o carregamento total, ou seja cerca de 2%.

Quando falamos do caso em que a matriz passa a ser o Feldspato ocorre o semelhante ao modelo M3A. Onde existia compressão passa a existir tracção e com intensidade de aproximadamente metade (Figura 54).

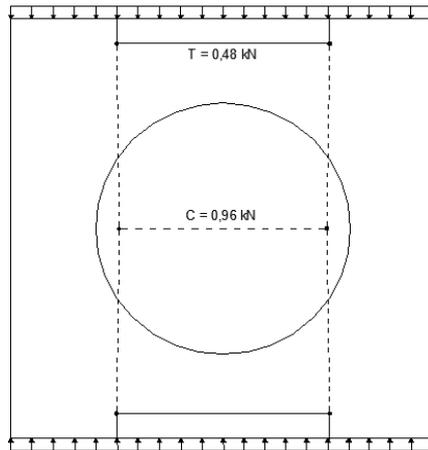


Figura 54 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3B - Matriz de Feldspato)

### 5.3.1.3. Modelo M3C

Segue-se por último o modelo com mineral de Feldspato com diâmetro de 0,80m (M3C) (Figura 55) e respectivos diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  (Figura 56).

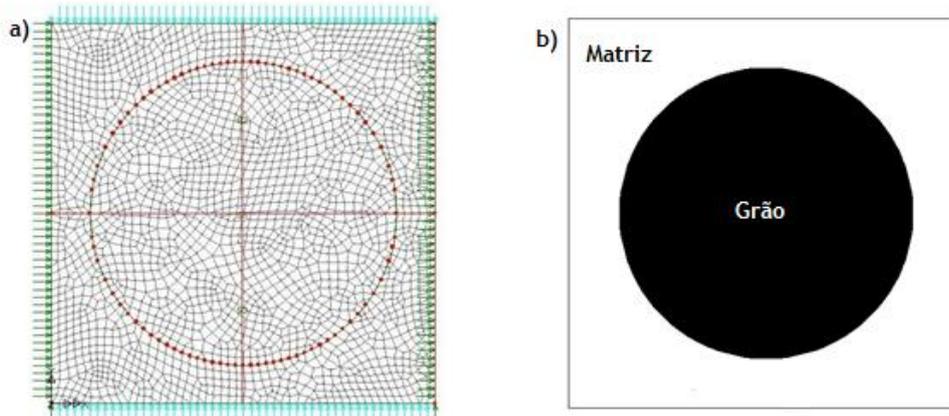


Figura 55 - Modelo de cálculo (M3C) e disposição dos minerais

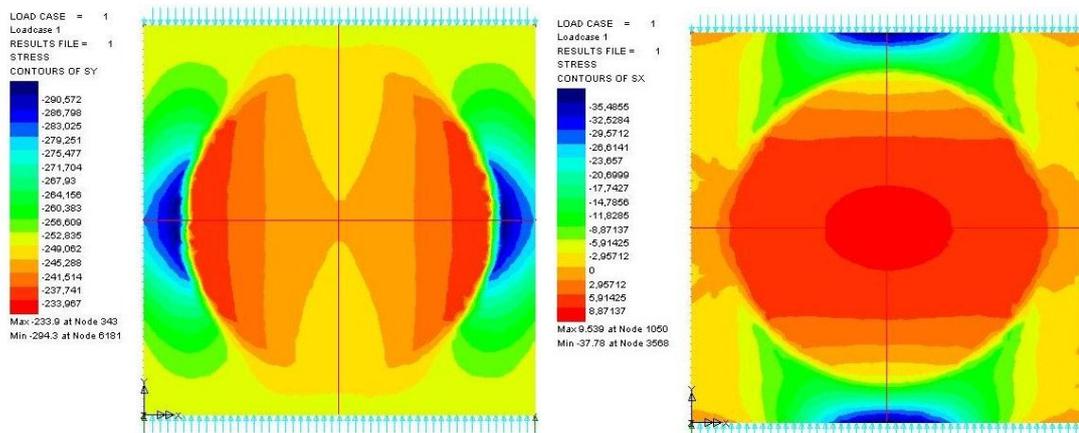


Figura 56 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M3C - Matriz de Quartzo)

Da análise dos mapas de tensões e procedendo da mesma forma obteve-se o seguinte modelo de escoras e tirantes para o modelo com diâmetro de 0,80m (M3C) (Figura57).

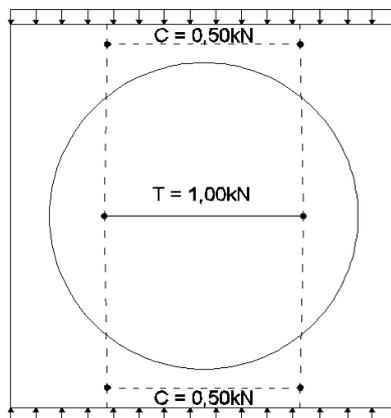


Figura 57 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3C - Matriz de Quartzo)

O equilíbrio processa-se da mesma forma apesar de a força de tração no interior do mineral de Feldspato ter diminuído. Como nos casos anteriores as forças continuam a ter tendência a desviar-se do mineral menos rígido e a serem conduzidas através do Quartzo, mas neste modelo devido à dimensão que o mineral possui estas acabam por atravessar em grande parte o Feldspato. No caso em que a matriz muda para Feldspato as forças em jogo também diminuíram de intensidade com a tração a surgir no Feldspato com uma intensidade inferior à existente no mesmo modelo mas com matriz de Quartzo (Figura 58).

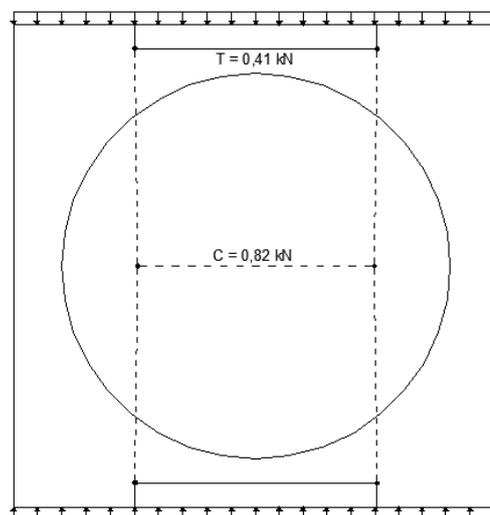


Figura 58 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M3C - Matriz de Feldspato)

Tabela 10 - Influência da dimensão do grão

Modelo	Proporção Grão/Matriz	Matriz de Quartzo		Matriz de Feldspato	
		T (kN)	C (kN)	T (kN)	C (kN)
M3A (d=0,40 m)	0,14	0,8	0,4	0,4	0,8
M3B (d=0,60 m)	0,39	1,1	0,55	0,48	0,96
M3C (d=0,80 m)	1,01	1,0	0,5	0,41	0,82

A Tabela 10 resume a intensidade da resultante das forças dos modelos M3A, M3B e M3C. O aumento da dimensão do grão provoca também um aumento das tracções até uma determinada dimensão em que o grão se torna demasiado grande e as forças acabam por atravessá-lo sem necessidade de a resultante se desviar tanto da direcção vertical. Em relação ao mineral que constitui a matriz observa-se que as maiores tracções surgem quando a matriz é de Quartzo e as maiores compressões quando a matriz é de Feldspato. Na generalidade verifica-se que com a variação da dimensão e da proporção grão/matriz variam os valores das tracções que podem ser um indicador de que o tamanho de grão influencia a propagação de fissuras. As tracções surgem sempre dentro do Feldspato que é menos resistente que o Quartzo, o que coincide com as observações de outros autores [1] [16].

### 5.3.2. Influência da distribuição espacial dos minerais

Os modelos até aqui apresentados tentam representar apenas o que acontece no interior de um único grão de Feldspato ou Quartzo considerado apenas envolto pela matriz. Na realidade existem mais minerais em seu redor que interagem entre si para gerar o equilíbrio. Para determinar a forma como esse equilíbrio acontece procedeu-se, em primeira análise à modelação de um grão com diâmetro de 0,80m (Modelo M3C), considerando condições de simetria através da introdução no modelo de apoios bloqueando as translações horizontais (Modelo M4) (Figura 59).

#### 5.3.2.1. Modelo M4

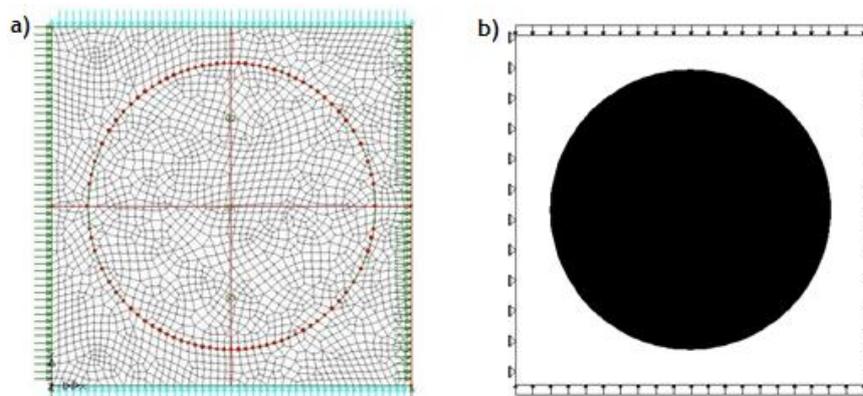


Figura 59 - Modelo de cálculo com simetria (M4)

O carregamento mantém-se assim como as propriedades mecânicas dos materiais e o Coeficiente de Poisson manteve-se nulo, pelos motivos mencionados anteriormente. Obtêm-se através de cálculo pelo Método dos Elementos Finitos as tensões no plano nas direcções XX e YY e calculam-se as resultantes dessas tensões segundo ambas as direcções. Para o modelo M4 obtiveram-se os seguintes diagramas de tensões (Figura 60) e respectivo modelo de escoras e tirantes (Figura 61).

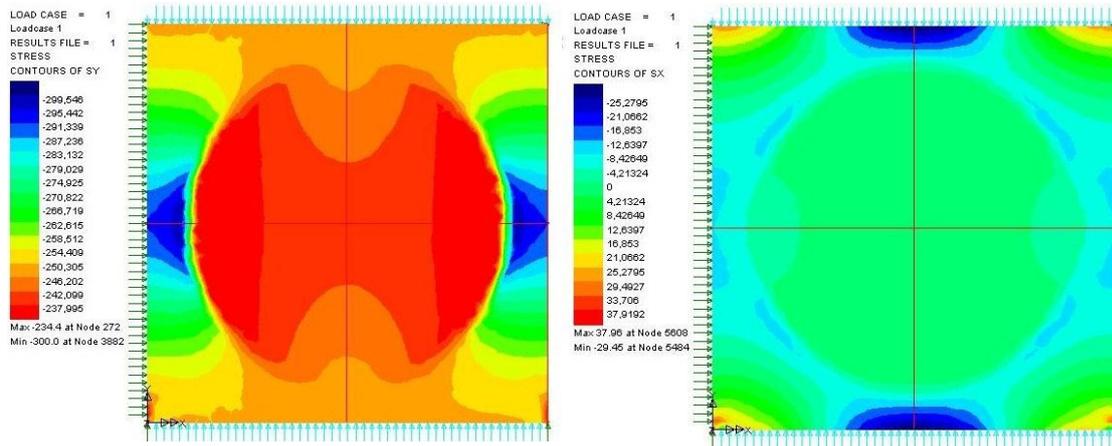


Figura 60 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M4 - Matriz de Quartzo)

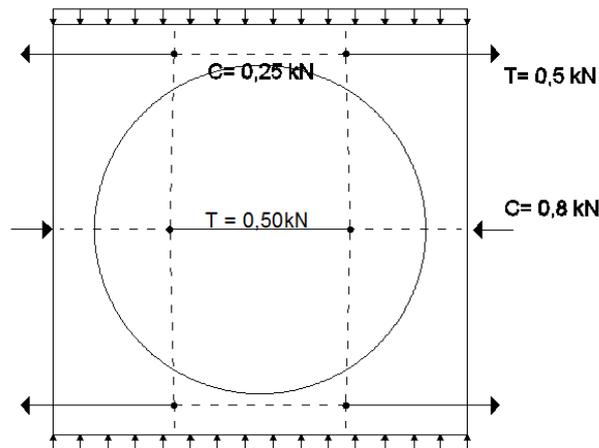


Figura 61 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M4 - Matriz Quartzo)

O caminho das forças determinado implica a existência de forças que geram o equilíbrio entre os vários minerais de Feldspato e a matriz de Quartzo no interior de um meio com muitos grãos. A maior tracção surge de igual forma na matriz de Quartzo e no interior do Feldspato (Figura 61). Como este possui menor capacidade resistente á tracção será no interior do Feldspato que surgirá a primeira fissura. Quando se inverte o posicionamento dos minerais passando o Feldspato a constituir a matriz (Figura 62) as maiores tracções surgem na fronteira entre o grão de Quartzo e Feldspato (0,72 kN) e o grão de Quartzo fica comprimido.

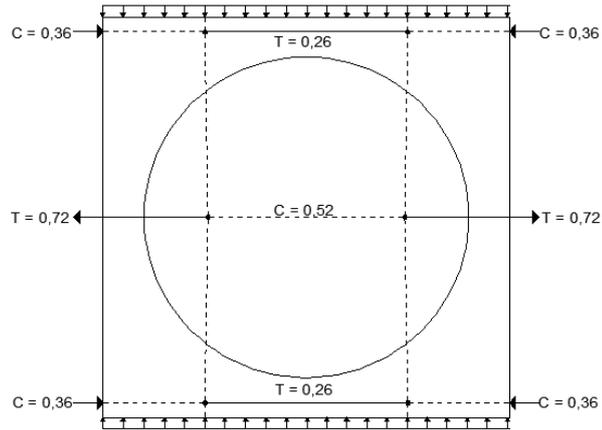


Figura 62 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M4 - Matriz Feldspato)

### 5.3.2.2. Modelo M5

Todavia o modelo apresentado continua a ser aproximado na representação do caminho das forças devido ao facto de existirem muitos minerais próximos na direcção horizontal como também na direcção vertical. Para superar essa limitação criou-se o Modelo M5 (Figura 63) considerando vários minerais próximos entre si. Com base nessa modelação obteve-se um modelo de escoras e tirantes semelhante mas em que a intensidade das forças é diferente (Figura 65).

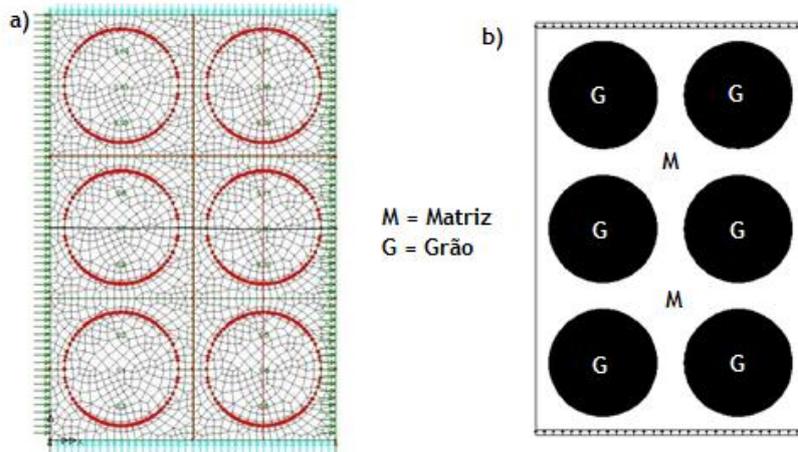


Figura 63 - Modelo de cálculo com minerais alinhados (M5)

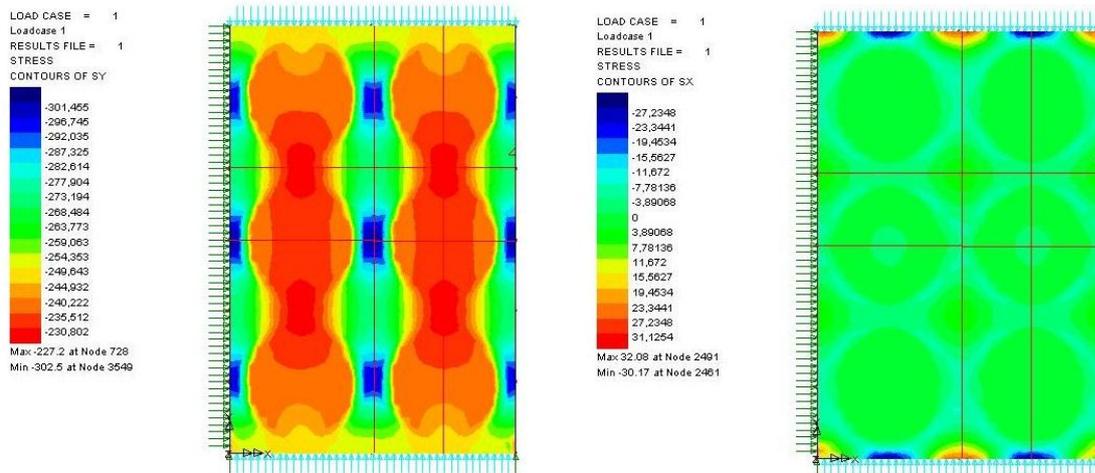


Figura 64 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M5 - Matriz de Quartzo)

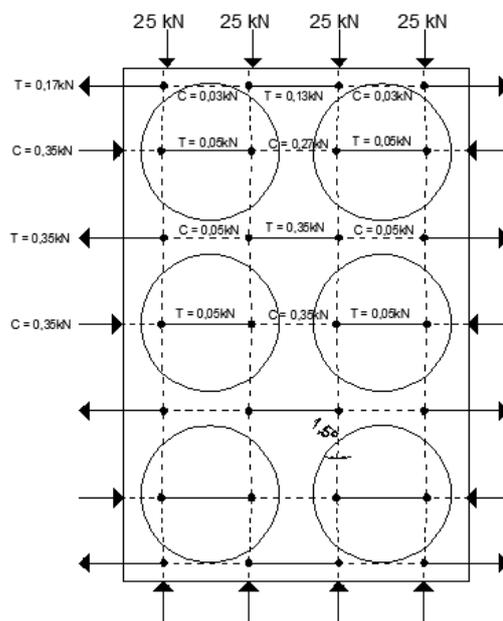


Figura 65 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M5 - Matriz de Quartzo)

As maiores tracções surgem na matriz de Quartzo nas zonas entre os minerais de Feldspato e são muito superiores às tracções que surgem no interior dos Feldspatos (Figura 64 e 65), sendo plausível que a fissura surja em primeiro lugar no Quartzo e que esta possa progredir ao longo do granito através de uma zona alinhada que se pode assimilar a um " pilar de Quartzo de secção transversal variável. Esta situação pode ser representativa de planos de anisotropia que podem ser encontrados nos granitos em que os minerais adquirem um alinhamento preferencial.

Como nos modelos anteriores este modelo foi também calculado trocando a posição relativa dos minerais ficando o Feldspato como matriz. Verificou-se comparativamente ao modelo anterior, que a intensidade das forças aumentou (de 0,35 para 0,44 kN) estando a surgir as tracções na matriz (Figura 66).

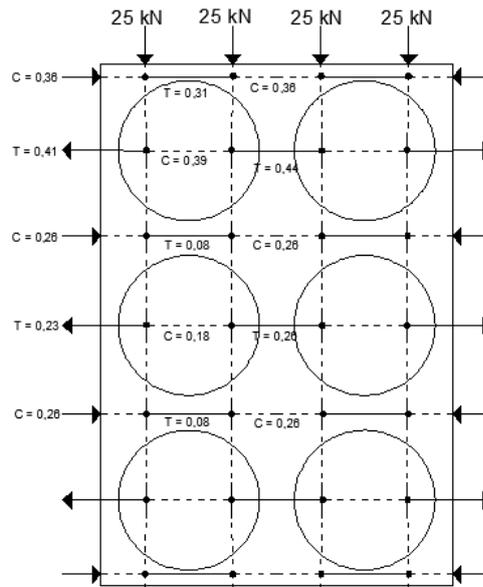


Figura 66 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M5 - Matriz de Feldspato)

### 5.3.2.3. Modelo M6

A disposição anterior (Figura 63) dos minerais não é a única possível porque muito provavelmente estes encontram-se desalinados e para considerar essa possibilidade concebeu-se o Modelo M6 (Figura 67) semelhante aos anteriores mas desalinhando os minerais.

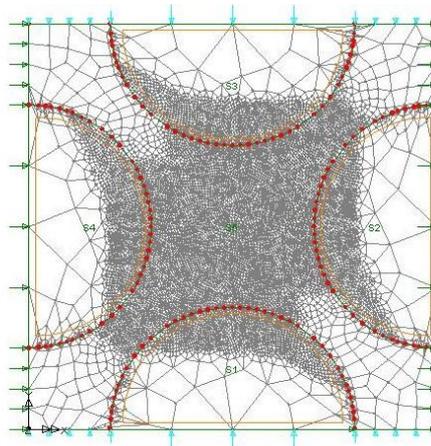


Figura 67 - Primeiro Modelo de cálculo com minerais desalinados

Este modelo foi simplificado de forma a melhor interpretar o que se sucedia na matriz e aliviar o volume de cálculo a realizar pelo programa. Desta feita o carregamento actuante não é constante. Os 50 kN/m foram distribuídos segundo a rigidez e proporção relativa de cada mineral aplicando sobre o Quartzo mais carga do que no Feldspato seja este ou não, o mineral que constitui a matriz (Figura 68).

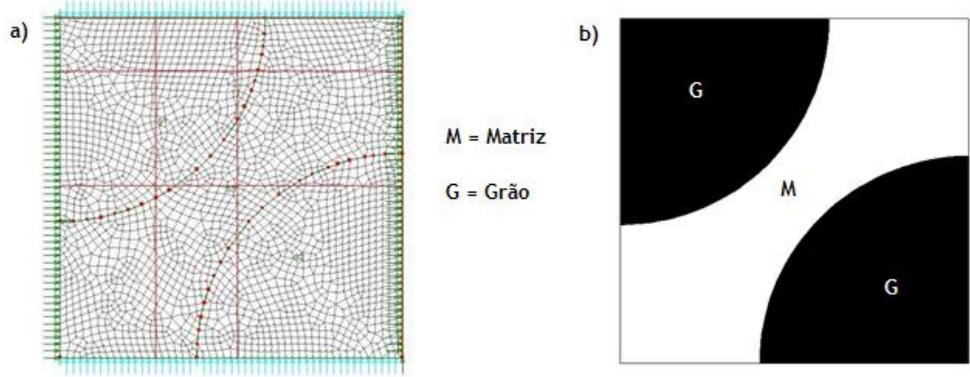


Figura 68 - Modelo de cálculo com minerais desalinhados (Modelo M6 - Matriz de Quartzo)

Do cálculo realizado obtiveram-se os diagramas de tensões segundo XX e YY, respectivamente (Figura 69). Observa-se que as tensões concentram-se mais no Quartzo por este ser mais rígido especialmente junto à fronteira do mineral de Feldspato. A mudança de direcção das tensões que eram verticais produz tracções dentro do Feldspato que são equilibradas pelas compressões que surgem no Quartzo. Com base nestes resultados, criou-se o seguinte modelo de escoras e tirantes (Figura 70).

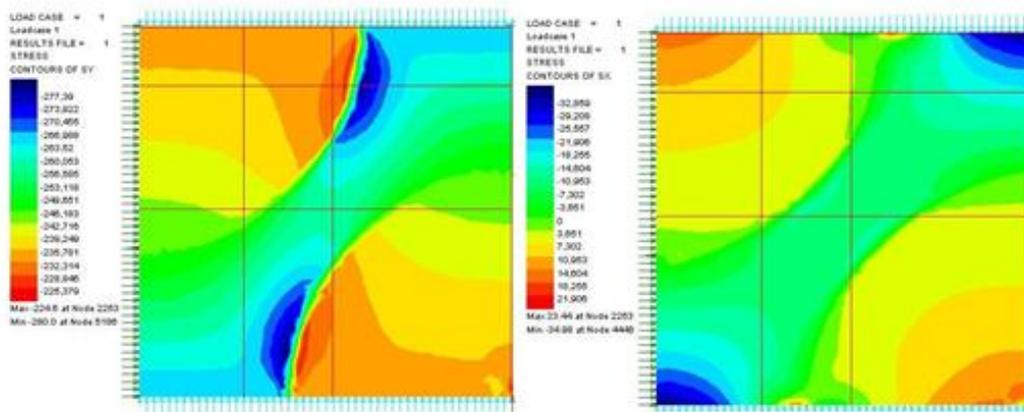


Figura 69 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M6 - Matriz de Quartzo)

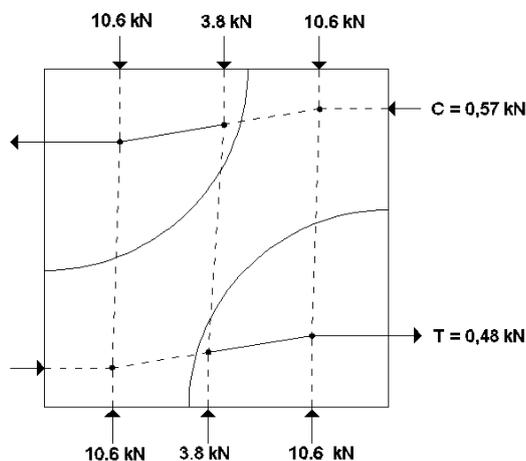


Figura 70 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M6 - Matriz de Quartzo)

Neste modelo o equilíbrio é feito de forma mais complexa. A transmissão da carga não se procede segundo um caminho horizontal mas oblíquo devido ao desalinhamento dos minerais e conseqüentemente das resultantes da carga que lhes é aplicada. O equilíbrio é satisfeito quando o momento gerado pelas forças horizontais é igual e de sentido contrário ao momento gerado pelas forças verticais (Figura 70).

Contrariamente ao modelo anterior, neste modelo as tracções surgem no interior do Feldspato, sendo aí que podem surgir as primeiras fissuras. Neste caso não se formam “pilares de Quartzo” com largura variável onde nos alargamentos dos mesmos surgiam as tracções. No caso em que se inverte a posição relativa dos minerais passando o Feldspato a matriz continuam a existir compressões maioritariamente dentro do Quartzo, mas a intensidade das forças é superior (Figura 71).

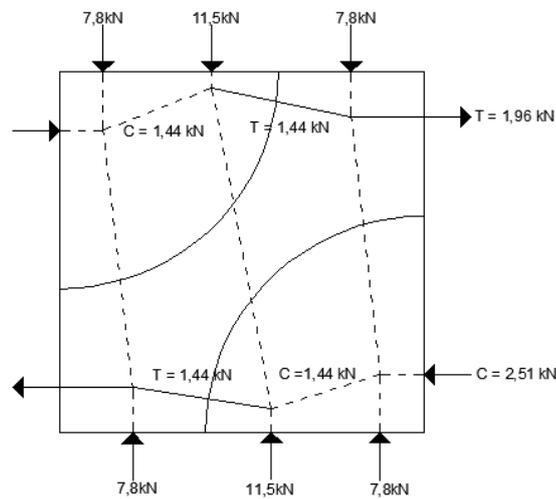


Figura 71 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M6 - Matriz de Feldspato)

Analisando a natureza hiperstática dos modelos de escoras e tirantes, pode afirmar-se que a existência de tracções e eventuais fissuras na matriz ou nos grãos pode levar a uma redistribuição de esforços, aumentando as compressões, sem necessariamente levar à ruína.

#### 5.3.2.4. Modelo M7

Falta saber qual o mecanismo de equilíbrio que se forma no momento do aparecimento de uma fissura. Com base no Modelo M5 dos Feldspatos alinhados onde se verificou que as tracções surgiram no local onde os “pilares de Quartzo” eram mais largos modelaram-se dois minerais um sobre outro em que os apoios de simetria foram retirados no local entre estes dois minerais, criando-se o Modelo M7 (Figura 72).

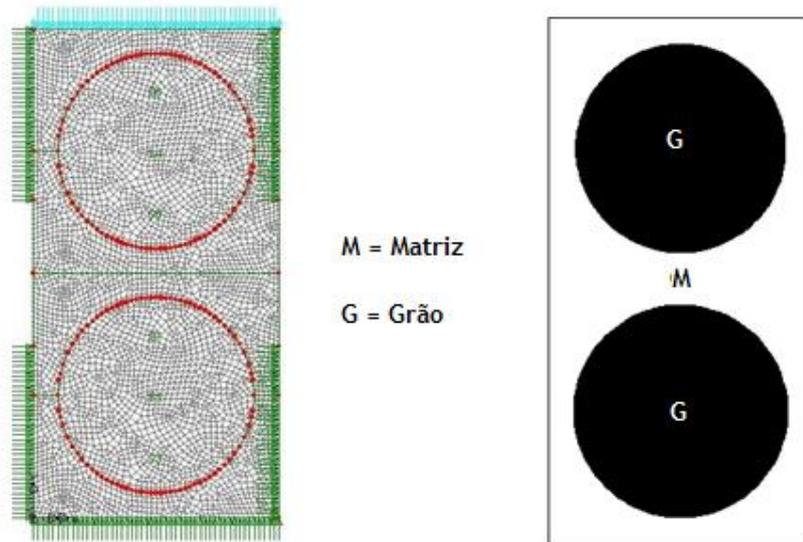


Figura 72 - Modelo de cálculo com fissura (Modelo M7 - Matriz de Quartzo)

Analisando o mapa de tensões segundo a direcção XX (Figura 73) observa-se que no local onde foi modelada fissura as tensões são nulas e o equilíbrio é feito à custa de maiores compressões na zona onde ainda não existe fissura. Observando o modelo de escoras e tirantes verifica-se que apesar do surgimento da fissura as forças são praticamente verticais (Figura 74).

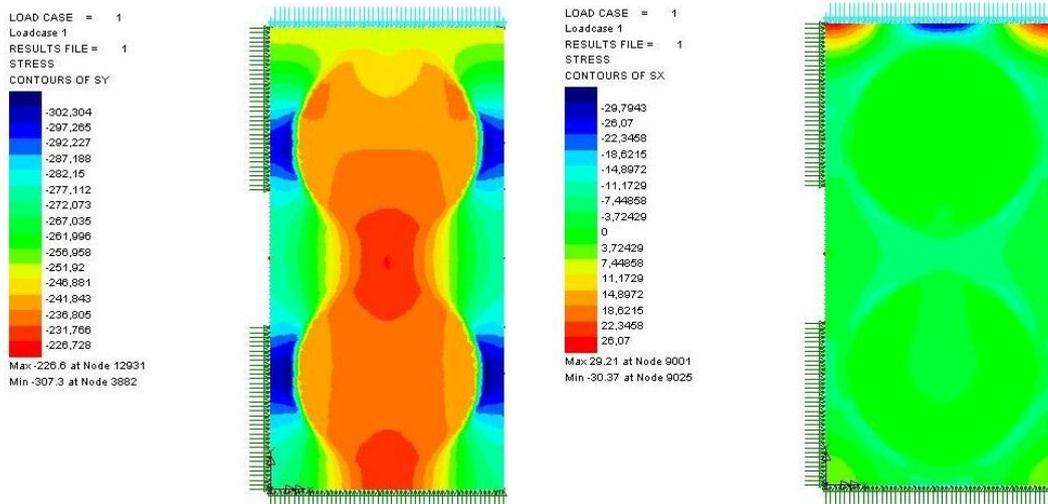


Figura 73 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo M7 - Matriz de Quartzo)

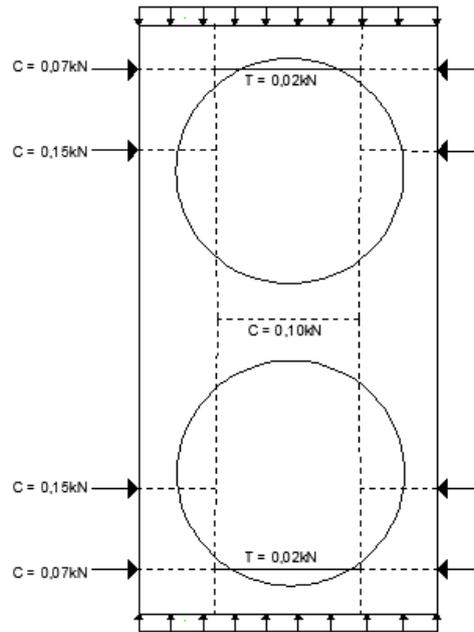


Figura 74 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo M7 - Matriz de Quartzo)

Na situação em que a matriz é de Feldspato (Figura75) o modelo foi alterado colocando os apoios de simetria no lugar onde antes não existiam, já que as fissuras no modelo M5 iriam surgir entre os grãos de Quartzo. As tracções surgem no interior do Feldspato e são muito maiores do que na situação anterior em que o Quartzo constituía a matriz. Poderá surgir uma nova fissura na fronteira entre os minerais e posteriormente a fissura que já existia iria progredir.

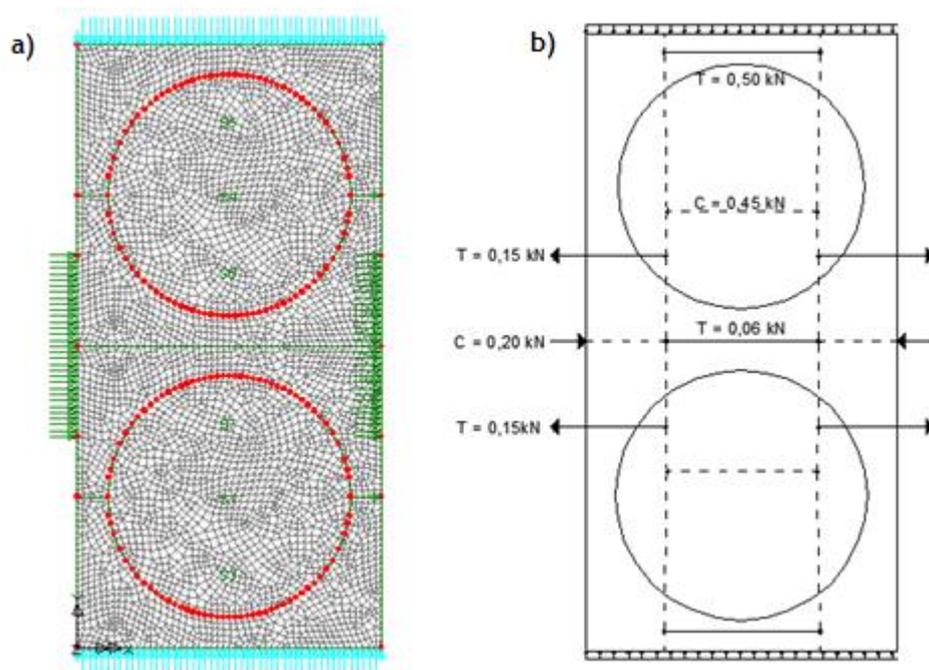


Figura 75 - a) Modelo M7 - Matriz de Feldspato; b) Modelo de escoras e tirantes

### 5.3.3. Influência da forma da junta

Depois de estudar e compreender a forma como surge o equilíbrio interno do granito nas várias hipóteses apresentadas procede-se ao estudo da junta e da forma como são conduzidas as forças ao longo da mesma. Tendo em conta as tecnologias de corte mais comuns foram modelados dois casos:

- Junta executada com disco diamantado (Modelo MDD);
- Junta executada com fio diamantado (Modelo MFD).

#### 5.3.3.1. Modelo MFD

A modelação da rugosidade foi feita de forma simplificada considerando a junta executada com disco diamantado (MDD) modelada como o contacto entre duas superfícies perfeitas (mas desencontradas) já que o corte com disco diamantado produz rugosidade muito reduzida (Figura 76). Em contra ponto no caso do fio diamantado (MFD), a modelação foi realizada considerando duas superfícies imperfeitas (Figura 81). Essa imperfeição foi materializada com a introdução relativamente ao modelo anterior de dois suportes de Quartzo entre os dois blocos, sendo estes os únicos caminhos possíveis para a transmissão de carga. O Quartzo como material mais rígido, será à partida o que ficará saliente na superfície. [28] [33]

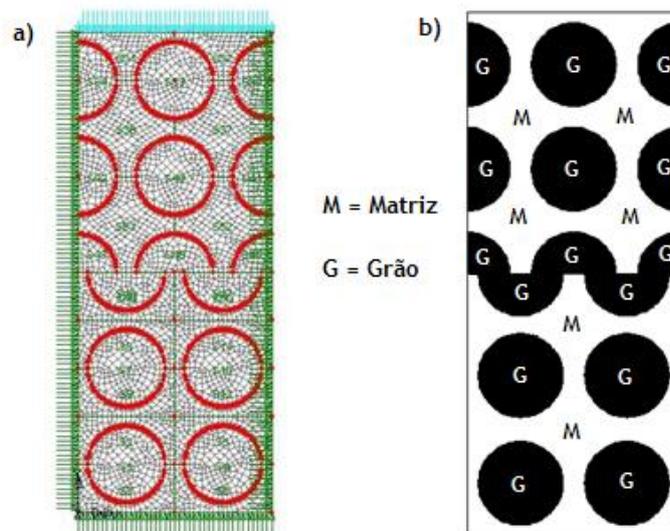


Figura 76 - Modelo de cálculo com disco diamantado (Modelo MDD)

Propositadamente os dois blocos foram desalinhados visto que a probabilidade de dois minerais iguais se encontrarem é diminuta e na zona da junta os minerais aparecem cortados ao meio já que também é pouco provável que o corte seja realizado entre dois minerais (Figura 76). Utilizando as mesmas propriedades mecânicas e a mesma solicitação obtiveram-se os seguintes diagramas de tensão (Figura 77).

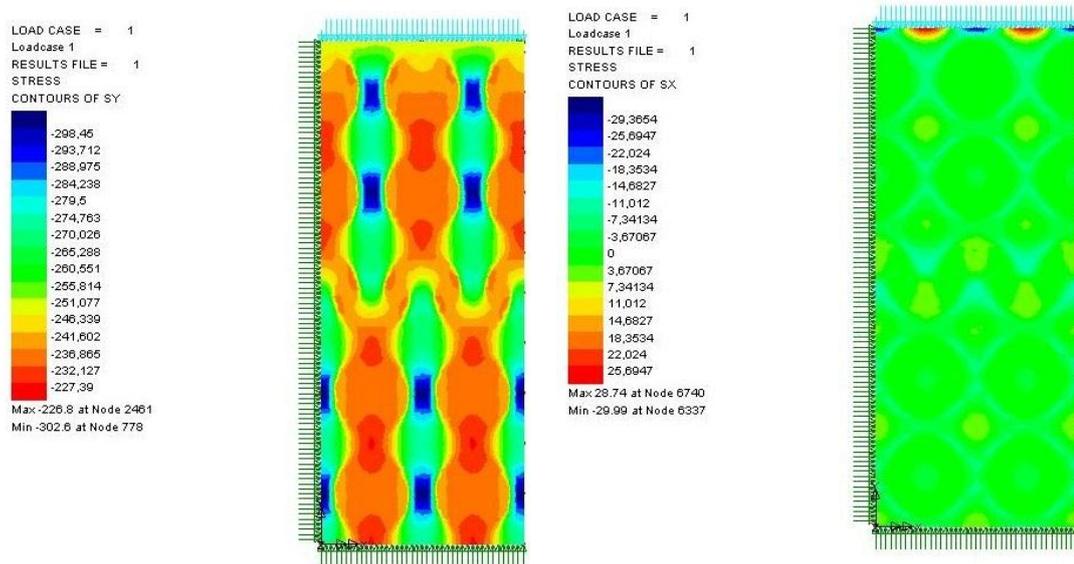


Figura 77 - Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)

Verifica-se que as maiores compressões continuam a surgir no Quartzo, principalmente nas zonas entre os Feldspatos tal como acontecia nos modelos anteriores. Observando na direcção XX verifica-se que surgem as maiores tracções entre os minerais de Feldspato como aconteceu nas modelações anteriores, mas na zona da junta estas acabam por surgir dentro do Feldspato, devido ao desvio provocado pelo não alinhamento dos minerais e ao facto de o Quartzo ser mais rígido (Figura 78 e 79). Presume-se então que as fissuras iniciarão na junta nos minerais de Feldspato.

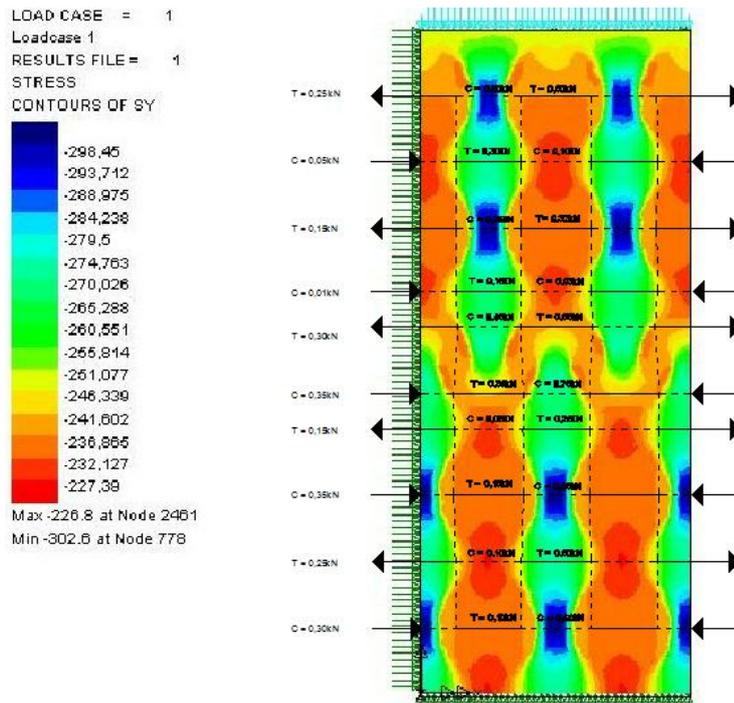


Figura 78 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)

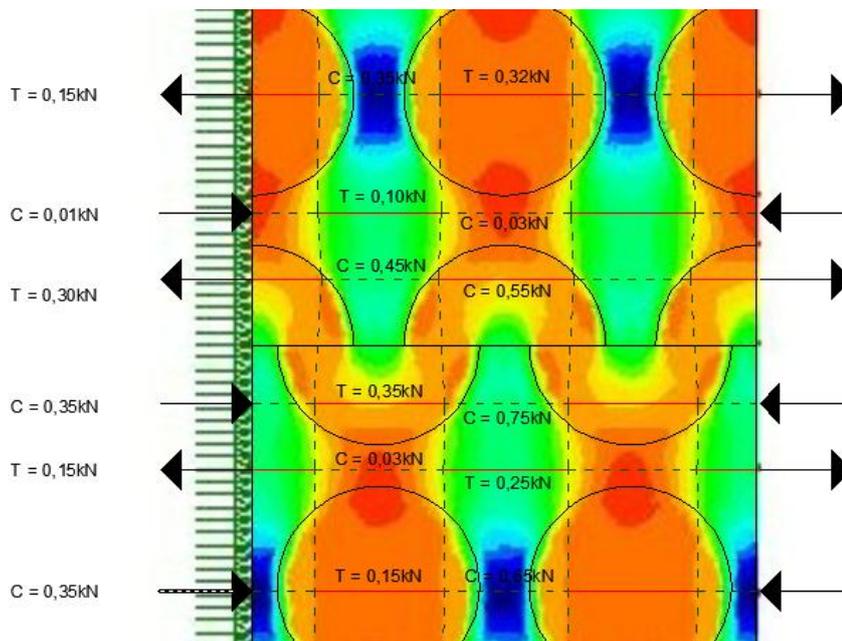


Figura 79 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)

Estudou-se também o caso em que a matriz passa a ser de Feldspato. Nesta situação o equilíbrio faz-se com tracções da mesma ordem de grandeza ( $T=0,40$  kN) que continuam a ocorrer dentro do Feldspato em zona adjacente à junta entre blocos (Figura 80).

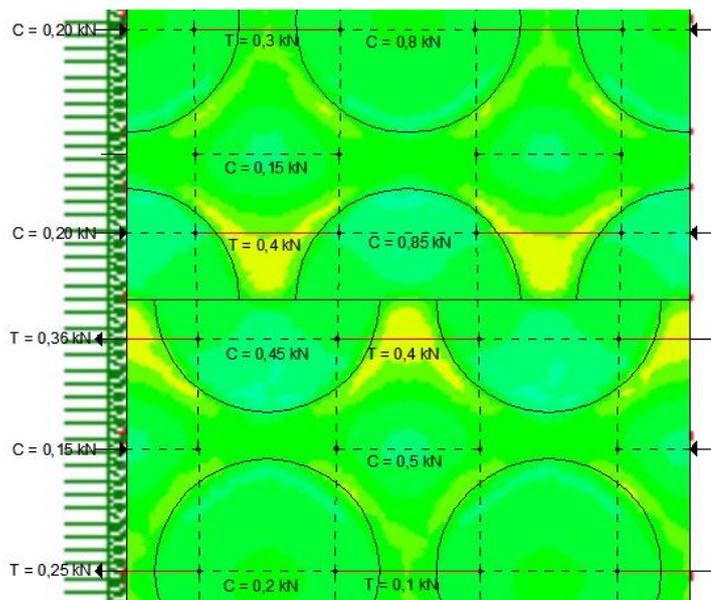


Figura 80 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Feldspato)

### 5.3.3.2. Modelo MFD

A segunda modelação consiste no estudo da junta executada com fio diamantado (Modelo MFD). Comparativamente ao anterior este modelo possui dois calços de Quartzo que representam os picos e vales da rugosidade da superfície (Figura 81). Dada a grande rigidez do granito, a altura livre da junta é geralmente muito superior às deformações dos bordos adjacentes, que na prática nunca se encostam. Foi escolhido para material destes suportes o Quartzo já que como este é um material mais rígido, à partida será o que menos se desgastará durante o corte e ficará saliente.

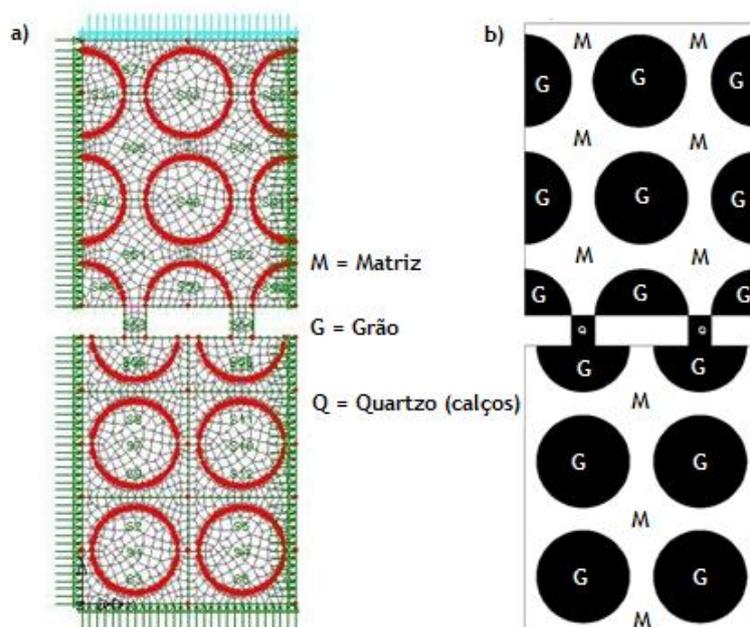


Figura 81 - Modelo de cálculo para fio diamantado (Modelo MFD)

Os únicos caminhos possíveis para a transmissão das forças resultantes do carregamento são os suportes de Quartzo, que concentrarão elevadas tensões nessa zona causando significativas tracções no interior dos minerais (Figura 82).

Na situação da matriz de Quartzo as forças continuam como em modelos anteriores a seguirem próximas ao mineral mais rígido, mas como neste caso o único caminho a seguir são os suportes de Quartzo, o campo de forças “afunila” introduzindo grandes compressões junto ao Quartzo que são equilibradas por grandes tracções nos Feldspatos com grandeza de aproximadamente 10 vezes os valores registados nos modelos anteriores. Analisando o mapa de tensões na direcção XX observa-se que estas seguem o padrão normal (tracção no interior dos Feldspatos equilibrada com compressão no Quartzo adjacente, e vice-versa) mas próximo da junta essa distinção anula-se, já que como dito anteriormente o campo de forças estreita e geram-se tracções e compressões elevadas (Figura 83 e 84). De salientar ainda que após esta zona as tensões na direcção XX são quase nulas, já que o caminho das forças é feito de forma quase vertical por influência da junta.

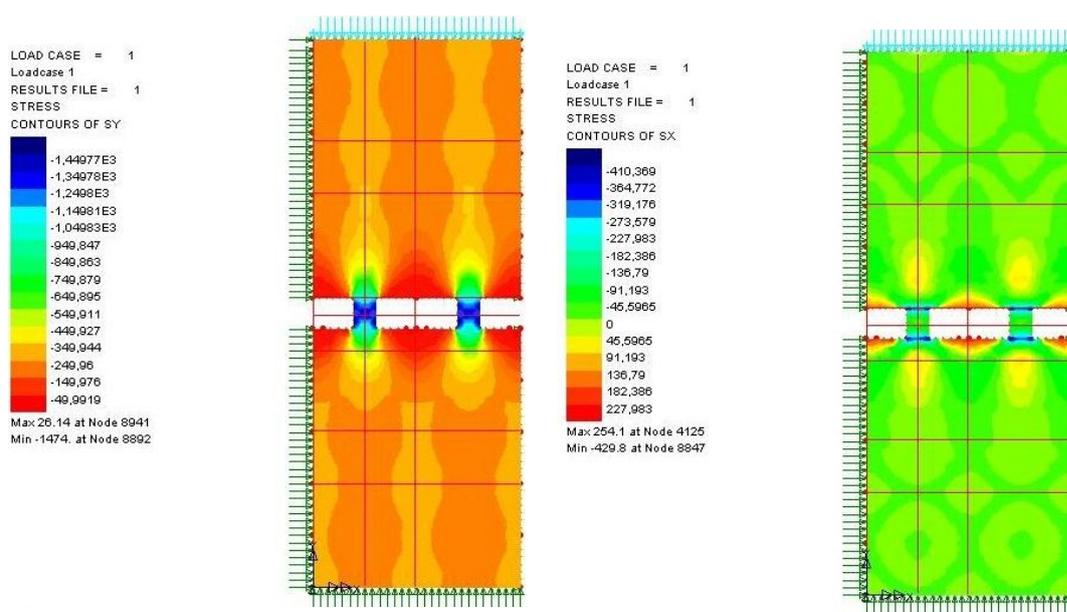


Figura 82- Diagramas de tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  respectivamente (Modelo MFD - Matriz de Quartzo)

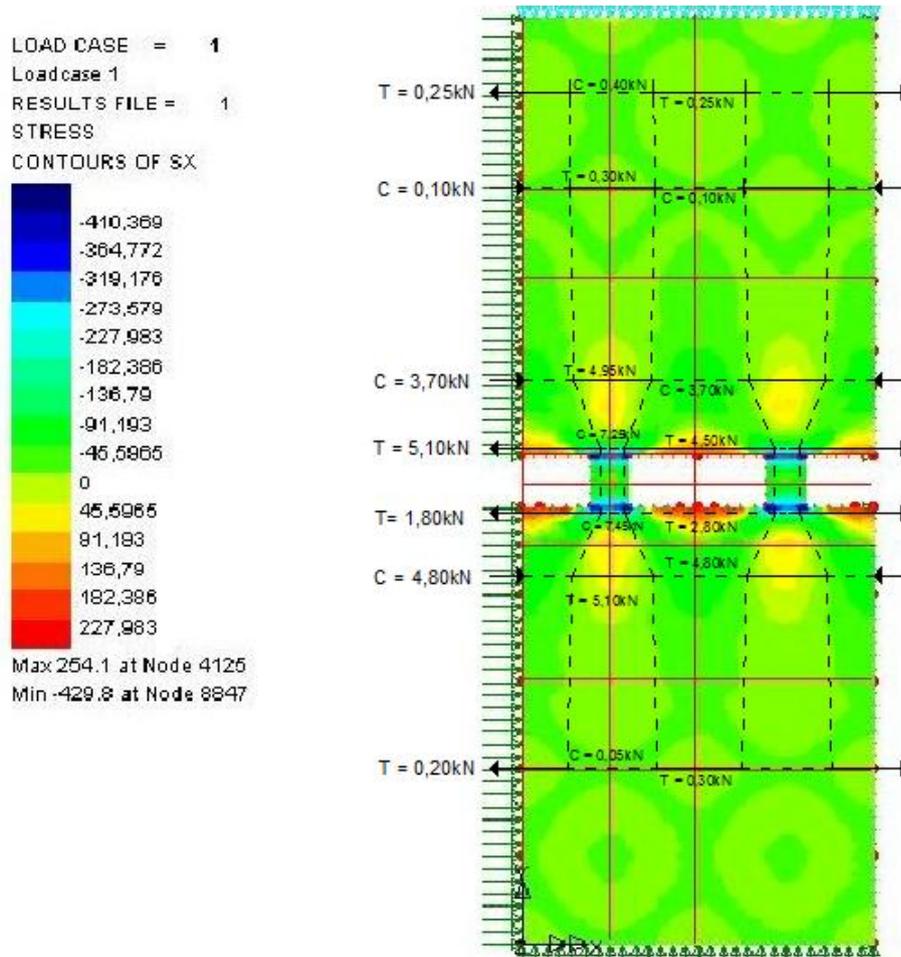


Figura 83 - Modelo de escoras e tirantes (Modelo MFD - Matriz de Quartzo)

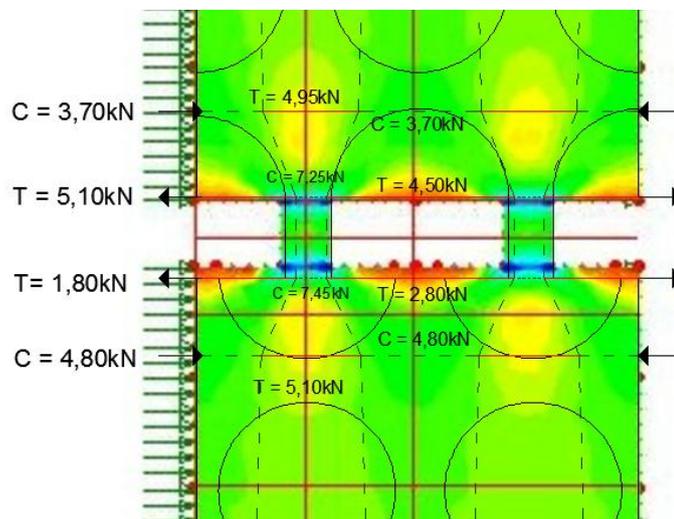


Figura 84 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Quartzo)

No modelo com matriz de Feldspato o calço de Quartzo foi alargado pois este acabaria por concentrar muita força na matriz de Feldspato (menos rígido) da parte superior do modelo. A probabilidade de o Quartzo contactar apenas com o Feldspato considerou-se reduzida. As tracções são semelhantes ao modelo anterior e surgem com mais intensidade no Feldspato,

embora no Quartzo também sejam relevantes. Presume-se que nesta situação as fissuras iniciem nessa zona e que rapidamente surjam também no interior do Quartzo (Figura 85).

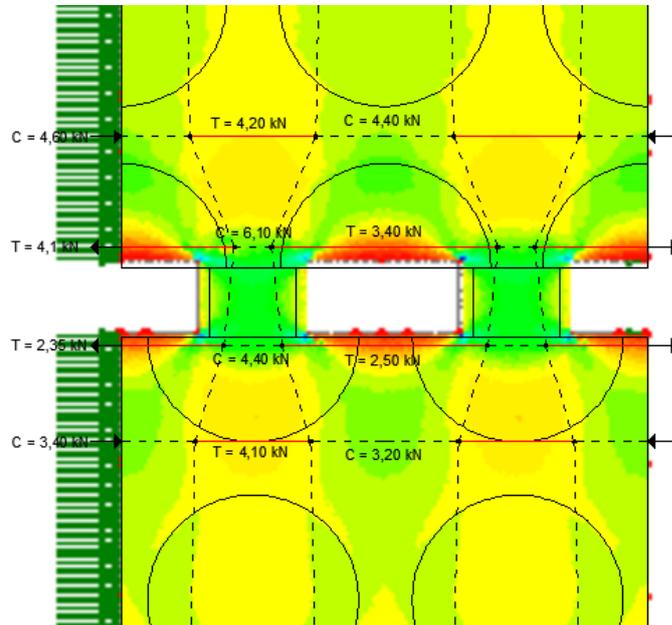


Figura 85 - Pormenor da zona da junta (Modelo MDD - Matriz de Feldspato)

Conclui-se que não são apenas os parâmetros de amplitude de rugosidade os mais importantes, mas em primeira instância os parâmetros de espaçamento que definem o espaço entre os pontos de contacto (aqui simulados pelos suportes de Quartzo). Os parâmetros de amplitude serão importantes numa fase posterior já que a deformação dos minerais e o surgimento das primeiras fissuras levarão a que as superfícies que não contactavam passem a contactar. O deslocamento necessário para o encosto das duas faces entre pontos de apoio já depende dos parâmetros de amplitude.

# Capítulo 6

## Análise Experimental

### 6.1. Introdução

O presente capítulo pretende descrever a experiência laboratorial referindo a forma como os ensaios foram conduzidos e monitorizados observando, e descrevendo todos os fenómenos que irão ser úteis no estudo da influência das juntas na construção de estruturas de cantaria de granito. Noutro documento a disponibilizar pelo autor, o leitor poderá encontrar um relatório dos ensaios realizados que inclui os resultados de medição com ultra-sons, imagens e dados registados durante os ensaios.

A primeira questão é determinar a influência da rugosidade das juntas no desempenho do pilar. Para tal são ensaiados pilares com iguais dimensões, mas em que a rugosidade difere devido ao processo de corte ser diferente. O primeiro grupo de ensaios destina-se a determinar a resistência à compressão do granito para poder avaliar o efeito redutor das juntas. Posteriormente realizam-se 2 grupos de ensaios destinados a testar juntas de superfícies executadas com disco diamantado e juntas de superfícies executadas com fio diamantado.

As juntas ensaiadas tem características distintas resultantes da forma como foi executado o corte. Os provetes ensaiados tinham faces imperfeitas, não planas com tendência a serem curvas (de simples ou dupla curvatura) e faces com superfícies muito rugosas e com ressaltos (Figura 89).

Os ensaios permitiram avaliar a qual a perda de resistência que as juntas provocam em comparação com a capacidade resistente em provetes semelhantes sem juntas e o mecanismo de rotura associado aos defeitos em causa. Tendo em conta a relevância dos defeitos geométricos dos provetes a questão da rugosidade das superfícies cortadas passou para segundo plano sendo apenas importante no caso em que o corte das superfícies é mais perfeito.

A secção transversal foi escolhida para que o equipamento disponível (Figura 86) tenha capacidade para levar à rotura os provetes. Como o valor máximo de carga do equipamento é de 2 MN, a área de secção dos provetes não poderia atingir os 12cm assumido uma tensão de rotura de 150 MPa. Para facilitar o corte dos provetes determinou-se que a sua secção seria 10x10 cm.

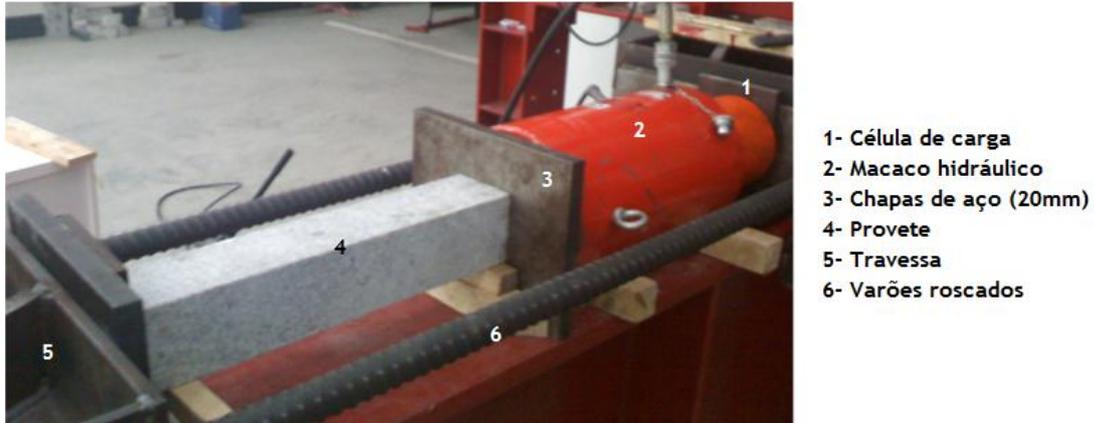


Figura 86 - Vista geral da montagem e do equipamento de carga

Determinadas as dimensões e características dos provetes estudou-se qual o número de provetes a testar. Os provetes agrupam-se em 3 conjuntos diferentes:

- Provetes sem juntas;
- Provetes com juntas efectuadas com disco diamantado;
- Provetes com juntas efectuadas com fio diamantado.

Segundo as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) devem ser testados no mínimo 5 provetes [37]. Uma das variáveis que pode produzir uma dispersão dos resultados é a microestrutura da rocha, que pode ser semelhante a olho nu mas na realidade não ser porque esta pode ser modificada devido a tensões elevadas. Segundo os mesmos autores, a distribuição normal de Gauss é a que melhor representa os resultados e será esta a utilizada para o tratamento dos resultados.

Em suma, o ensaio necessitará de pelo menos 15 provetes. Estes serão adquiridos na mesma pedra e provenientes do mesmo bloco para que sejam o mais semelhantes que possível a nível petrográfico e da sua microestrutura. O bloco inicial será então posteriormente cortado com as técnicas referidas de modo a obterem-se os 15 provetes. Os provetes numerados de 1 a 5 serão analisados sem junta, os numerados de 6 a 10 com junta serrada com disco diamantado e os provetes 11 a 15 com fio diamantado. O bloco em causa tem as dimensões a seguir apresentadas (Figura 87).

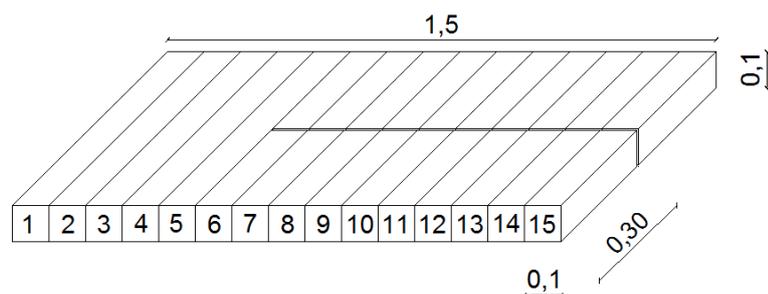


Figura 87 - Esquema de corte dos provetes

As dimensões incluem uma margem devida à largura do canal de corte provocada pela acção da ferramenta usada. No desenho fornecido à empresa é indicada uma tolerância para a ortogonalidade dos provetes que se considerou ter como valor máximo 2/1000 (Figura 88). As faces devem ser o mais ortogonais que possível de modo a evitar que os provetes produzam pilares com verticalidade e a aplicação de carga seja centrada.

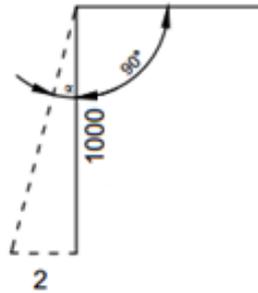


Figura 88 - Tolerância do corte (sem escala)

A fase seguinte consiste no ensaio de carga de cada um dos conjuntos de provetes acima descritos. Os ensaios foram relativamente rápidos aplicando carga até se atingir a rotura apenas com pequenas interrupções para observação dos fenómenos que estariam a acontecer. Foram medidas as forças em jogo através da célula de carga e as extensões com recurso a extensómetros colocados de forma a medir as deformações a que estão sujeitos os provetes. Todos os ensaios foram filmados e as imagens analisadas para visualizar e compreender o mecanismo de rotura.

Após a rotura são recolhidos os pedaços resultantes e estes são novamente montados para recriar o provete original e assim se observar todas as fissuras que surgiram.

O plano inicial foi posteriormente alterado, em virtude de se ter reconhecido a relevância do processo de corte relativamente aos parâmetros de rugosidade.

## 6.2. Preparação do ensaio

Os provetes ensaiados foram inspeccionados visualmente e ainda com a ajuda de um esquadro metálico de forma a verificar se as superfícies eram perpendiculares entre si. Quase todos os provetes tinham este defeito mas de diferentes proporções. Ao encostar uma régua a uma das arestas foi possível observar lombas em alguns dos provetes (Figura 89).



Figura 89 - Exemplo de defeito

A capacidade resistente do granito não é igual em todas as direcções devido à orientação e estrutura dos minerais do granito podendo identificar-se um plano forte, um intermédio e um mais fraco [38]. Para determinar qual o plano que estava a ser carregado efectuaram-se medições com aparelho de Ultra-sons (Figura 90) cujo princípio de funcionamento consiste na determinação do tempo de percurso de uma onda gerada por impacto na célula emissora do aparelho até à célula receptora. Quanto menor o tempo registado, menos desvios a onda fez no seu percurso, logo pressupõe-se a existência de menos vazios e por isso a capacidade resistente será à partida superior. Este método permite avaliar também a presença de fissuras no interior dos provetes.



Figura 90 - Aparelho de Ultra-sons

Todos os provetes foram inspeccionados nas três direcções e concluiu-se por comparação dos tempos registados que nenhum provete possuía fissuras internas pois os tempos são semelhantes entre si. Para averiguar quais seriam os planos fortes e fracos compararam-se os tempos do provete 8 que tem todas as dimensões iguais e permite por comparação entre as faces verificar em qual delas a velocidade é menor ou seja, verificar qual é o plano forte. Por observação da Tabela 11 conclui-se que a direcção B (Figura 91) é o mais forte. Devido à

carga ser aplicada no plano B capacidade de carga do material não é explorada na sua totalidade pois a rotura é condicionada pela abertura de fissuras por tracção perpendicularmente às direcções intermédia e fraca [38]. Segundo este autor, após ensaiar vários provetes com ultra-sons verificou que existiam diferenças de cerca de 10% entre as 3 direcções, apesar de os ensaios de compressão revelarem apenas diferenças de 6 MPa (3%). Em valores de resistência à tracção as diferenças entre as três direcções podem chegar aos 25% [38].

Tabela 11 - Tempo de atravessamento dos Ultra-sons do Provete 8

Direcção	Provete				
	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
A	19,1	18,3	19,9	21,1	18,3
B	17,9	18,1	18,4	18,9	17,6
C	17,9	19,9	19,6	19,4	19,1

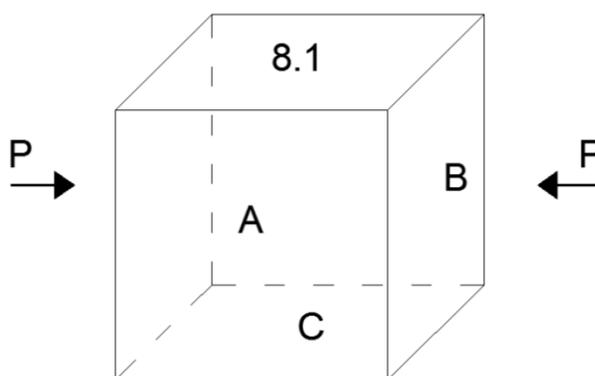


Figura 91 - Faces analisadas com Ultra-som

Durante a realização dos ensaios surgiu a necessidade de tentar perceber melhor a forma das superfícies das juntas pois a observação a olho nu e a utilização do esquadro não são suficientes. Para o fazer de forma expedita foi concebido um aparelho para varrer a superfície de encosto e detectar imperfeições e empenos medindo a cota dos pontos pretendidos, relativamente ao primeiro ponto que era considerado como sendo o ponto 0. Este aparelho foi uma adaptação do *Autoinfluenciómetro Mecânico Edgar Cardoso* (Figura 92), que possui uma roda que circula neste caso sobre a superfície do provete à qual foi acoplada um deflectómetro mecânico que media a diferença de cota em relação ao primeiro ponto. Este sistema foi pouco utilizado devido a algumas limitações práticas devido à altura dos provetes e porque é difícil colocar o provete na posição correcta já que as faces não são regra geral perpendiculares e a outra superfície de contacto também não é perfeita.

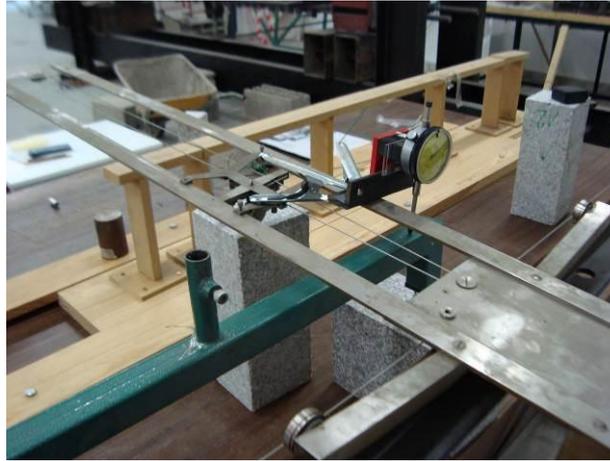


Figura 92 - Aparelho de caracterização de superfícies

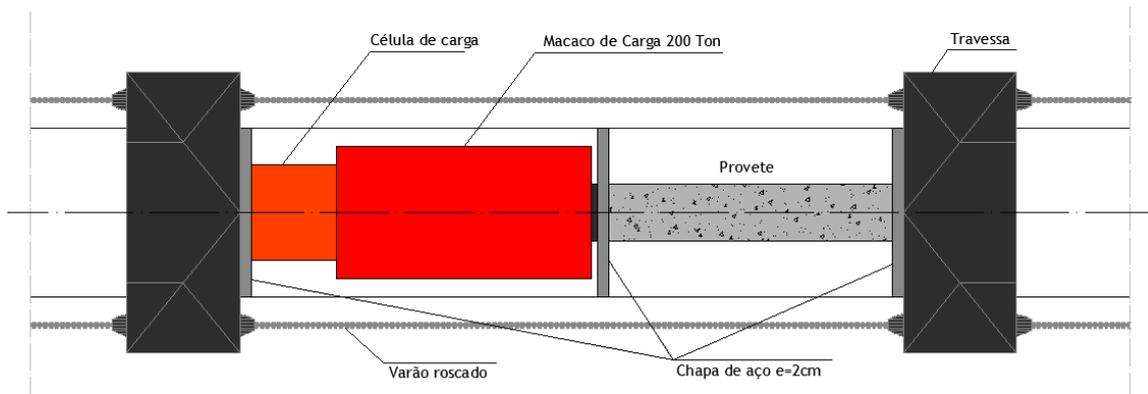
### 6.3. Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios de compressão foi necessário o seguinte equipamento laboratorial:

- Célula de carga;
- Macaco hidráulico com capacidade de 200 toneladas;
- Travessas e varões roscados em aço;
- Chapas de aço (20mm);
- Sistema de aquisição de dados;
- Extensómetros eléctricos.

O esquema de montagem é o representado na Figura 93. A célula de carga foi colocada por atrás do macaco hidráulico para ficar protegida dos impactos, não danificar o provete na rotura e para que o macaco hidráulico não tenha de a deslocar e assim provocar atrito causaria erros de medição. As travessas fazem a reacção da força aplicada transmitida através dos varões que necessariamente devem estar centrados em relação ao eixo do macaco hidráulico assim como todos os restantes componentes.

a)



b)

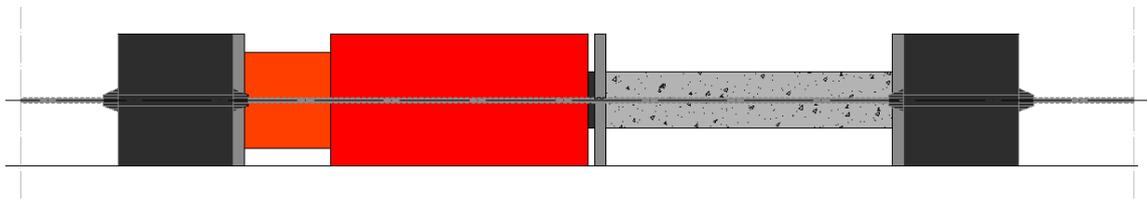


Figura 93 - a) Vista em planta; b) Vista em alçado

Os extensómetros foram colocados em cada face dos provetes, sendo denominados por E0 e E1 (faces laterais), E3 e E4 (face superior e inferior, respectivamente) conforme mostra a Figura 94. Para serem colocados de forma rápida e para serem mais facilmente recuperados os extensómetros foram colocados nos provetes com borrachas e fixos com grampos o que permitiu que fossem reutilizados o máximo possível e fazer leituras de extensões com rigor suficiente, em que a força determinada a partir da média das quatro extensões era aproximadamente 10MPa superiores relativamente ao valor registado pela célula de carga.

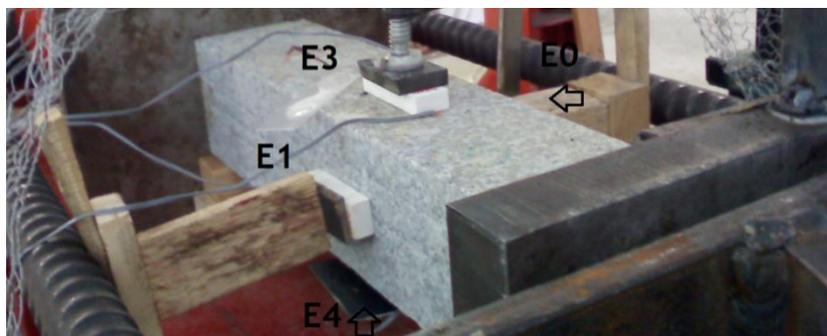


Figura 94 - Vista do posicionamento dos extensómetros



Figura 95 - Calibração dos extensómetros

A colocação dos extensómetros era feita com um pouco de cola o que pode provocar a diferença de 10 MPa quando colocada em excesso assim como as variações de temperatura. O sistema foi testado com sucesso com uma chapa em consola e carga na extremidade (Figura 95).

## 6.4. Procedimento experimental

O procedimento experimental seguido em todos os ensaios é descrito pelas seguintes etapas:

- Após a montagem do equipamento na posição prevista (Figura 93) faz-se a caracterização das superfícies do provete (quando possível) e descrevem-se os defeitos;
- Colocação do provete no equipamento depois de este ser limpo e se garantir que existe o mínimo de rugosidade nas chapas de carga;
- Ajustagem do ensaio aplicando cargas reduzidas de forma a obter valores de extensão em cada face aproximadamente iguais;
- Aplicação de carga até à rotura (sem qualquer taxa de aplicação de carga) registando a força medida pela célula de carga e a extensões registadas nos extensómetros, controlando as tensões obtidas através das extensões por comparação com o valor obtido através da célula de carga;
- Observação e registo das fracturas após a rotura através de fotografia e análise das filmagens;
- Reconstituição do provete para observação do padrão de fissuras após a rotura.

## 6.5. Descrição dos Ensaios

Os ensaios foram divididos em dois grupos em que o primeiro grupo é destinado a avaliar a capacidade resistente dos provetes de granito sem juntas e o segundo destinado a avaliar a influência das juntas e a diminuição da capacidade resistente. O resultado do corte não foi o esperado porque a maioria dos provetes possuía defeitos geométricos e por isso a realização dos ensaios não decorreu como inicialmente programado e já que os defeitos eram mais condicionantes do que a questão da rugosidade que passou para segundo plano. Ao contrário do inicialmente previsto apenas dois dos provetes iniciais (provetes 9 com junta executada em disco diamantado e provete 12 com junta executada em fio diamantado) foram ensaiados. Os restantes provetes foram subdivididos em cubos para aproveitar as faces que estavam bem cortadas.

### 6.5.1. Determinação do Módulo de Elasticidade (E)

O primeiro ensaio (Provetes 5) serviu como teste do equipamento e para comprovação do sistema de fixação dos extensómetros. Neste ensaio o provete esteve sobre vários ciclos de carga e descarga para afinação do equipamento em cargas reduzidas e aproveitaram-se os dados desta afinação para determinação do Módulo de Elasticidade (E). O cálculo (Tabela 12) não inclui o primeiro troço do diagrama de tensão-extensão (Figura 96) porque a deformação registada é influenciada pelo fechamento dos poros aumentando a rigidez do granito que se mantém a mesma até à rotura.

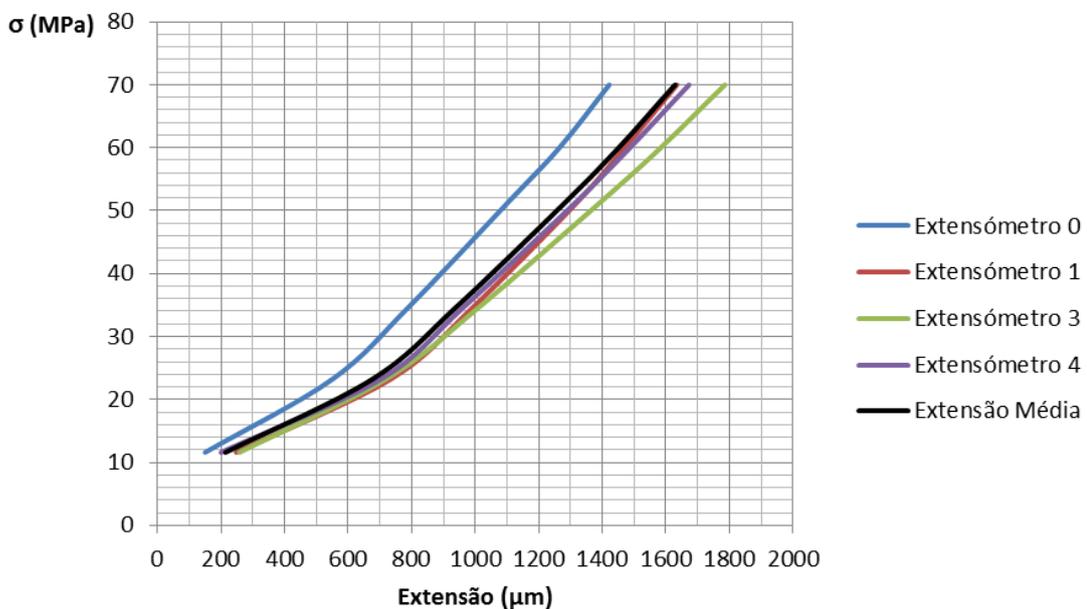


Figura 96 - Diagrama Tensão - Extensão

Tabela 12 - Determinação do Módulo de Elasticidade (E)

Força (kN)	Tensão (MPa)	Extensão Média ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Módulo de Elasticidade (GPa)
232	23,2	675,75	49,1
700	70	1629	

Através o cálculo da inclinação da recta do diagrama tensão-extensão determinou-se o valor de 49 GPa para o módulo de elasticidade do granito.

### 6.5.2. Provetes sem juntas

Os primeiros ensaios destinaram-se a determinar a capacidade resistente do granito. A força estava a ser aplicada na direcção normal ao plano forte e por isso as fissuras abrem devido às tracções nos planos fraco e intermédio. Por isso é de esperar que noutras condições, nomeadamente se a força for aplicada perpendicularmente ao plano fraco, os provetes podem apresentar uma resistência superior àquela registada nos ensaios realizados.

#### 6.5.2.1. Provete 5

O provete 5 resistiu até aos 122 MPa de tensão. A sua rotura iniciou junto à chapa do lado oposto ao macaco hidráulico e de seguida surgiram microfissuras (Figura 98) axiais que podem ter sido provocadas pela formação de uma cunha junto à chapa. Verifica-se a saída de pó na face inferior.



Figura 97 - Provede 5 - Configuração Inicial



Figura 98 - Provede 5 - Macrofissuras na rotura (face E0, macaco à direita)

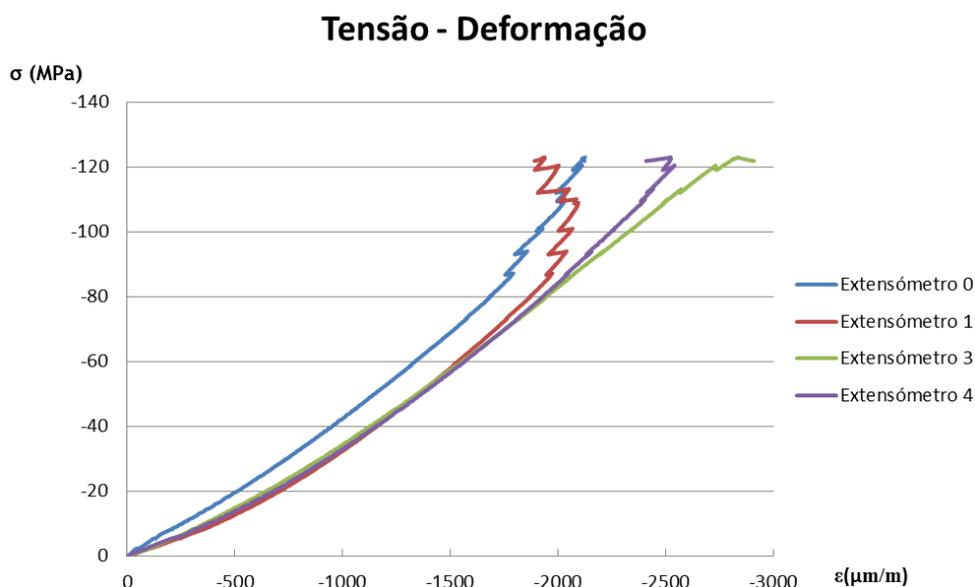


Figura 99 - Diagrama tensão-extensão do Provete 5

Verifica-se no diagrama (Figura 99) que a partir dos 90MPa existem oscilações provocadas pelo surgimento das fissuras e destaque de material junto às chapas e devido a isso as excentricidades aumentam e as extensões não evoluem da mesma forma.



Figura 100 - Provete 5 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

#### 6.5.2.2. Provete 3

O provete 3 teve um comportamento diferente e atingiu a tensão de rotura aos 99MPa. Foi colocado mais um extensômetro transversalmente numa extremidade da face 3 (à esquerda na Figura 101), para medir as extensões que ai ocorreriam e nos instantes antes da rotura os dados registados mostram um “salto” (de 570 para 2700  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) muito provavelmente devido a ter sido atravessado por uma fissura que se admitirmos um comprimento de referência de 50 mm poderia corresponder a uma fissura com abertura da ordem de 0,1 mm. Iniciou-se a destruição na face superior junto às extremidades com perda de material de forma explosiva na face E1 com destaque de peças de alguma dimensão. No lado oposto ao macaco formou-se

uma cunha que não se destacou devido à presença do extensómetro colocado na transversal (estes eram presos com grampos, que de alguma forma podem influenciar o destacamento de material). O processo continuou com a destruição progressiva na face superior junto ao macaco que culminou no destaque de uma peça junta à aresta e de alguma dimensão nessa face. Formam-se fracturas nessa face com dispersão de pó e partículas originando um plano de rotura inclinado de que resulta uma cunha. As chapas apresentam muito pó disperso principalmente na direcção vertical.



Figura 101 - Provete 3 - Planos de rotura e cunha resultante (face E0, macaco à direita)

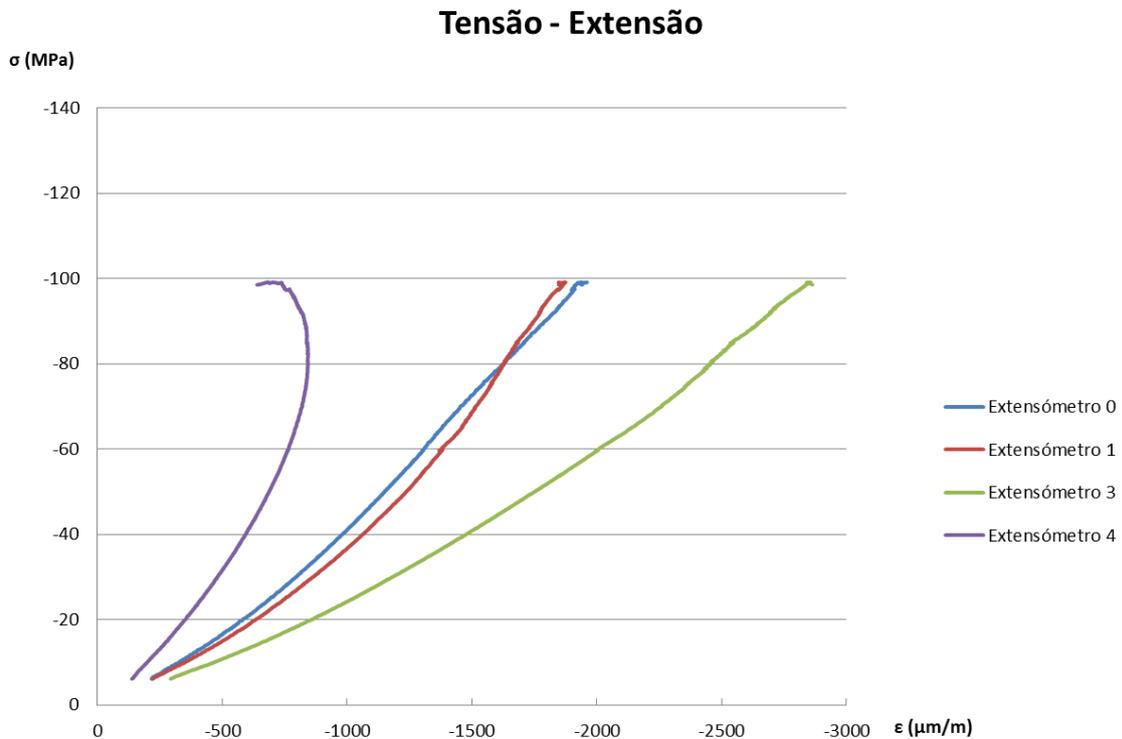


Figura 102 - Diagrama tensão-extensão do Provete 3

O extensómetro 3 registava a maior extensão estando de acordo com o mecanismo de rotura. Observa-se que este era um ensaio com grande excentricidade porque no instante da rotura as extensões E3 e E4 tinham quase 2500  $\mu\text{m}/\text{m}$  de diferença (Figura102).



Figura 103 - Provete 3 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

### 6.5.2.3. Provete 2

O provete 2 teve uma rotura muito particular. Aos 35 MPa surgiu sem que fosse esperado uma macro fractura axial com aproximadamente 42cm (Figura 105) que se deve a defeito geométrico na face carregada. No topo do provete, a superfície carregada não era suficientemente desempenada (plana), sendo visível a olho nu uma certa curvatura convexa. Esse defeito geométrico induz uma carga concentrada, de tipo “faca”. As extensões não foram registadas até à rotura porque os extensómetros foram retirados antecipadamente. Nas faces E1 e E3 surgiram precocemente microfissuras que provocaram a destruição do provete junto ao macaco na face E3. Nesse instante surgiu uma lâmina de material que se destacou. Através da análise das filmagens é possível ver a flexão das duas peças formadas pela microfissura e a progressão da mesma.



Figura 104 - Provete 2 - Contacto com a chapa de carga (face E0)

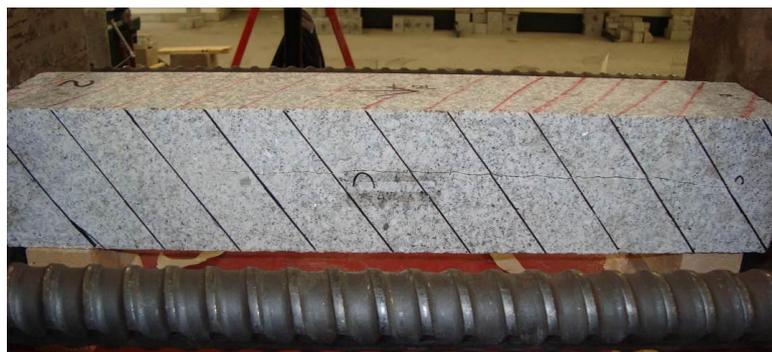


Figura 105 - Provete 2 - Fissura inicial (Face E0, macaco à direita)



Figura 106 - Provete 2 - Momento da Rotura (Face E1, macaco à esquerda)

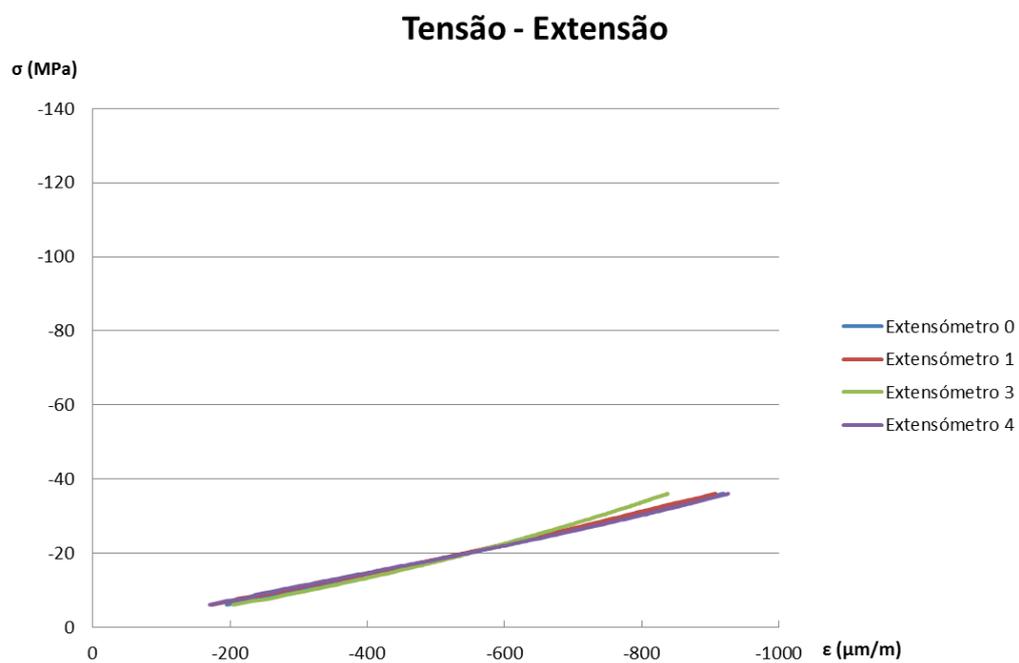


Figura 107 - Diagrama tensão-extensão do Provete 2 (fase inicial)

De salientar que as extensões medidas eram uniformes reforçando a ideia que de facto a superfície teria dupla curvatura (Figura 107).

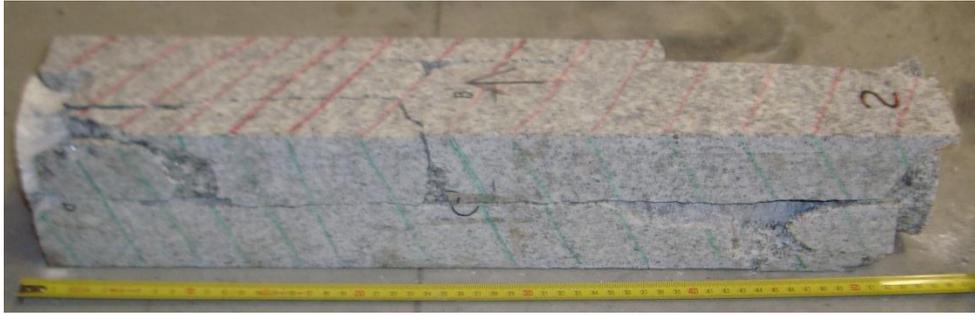


Figura 108 - Provete 2 - Vista da face E1 (marcada a verde, macaco à esquerda)

#### 6.5.2.4. Provete 6

O provete 6 foi o mais resistente e atingiu a rotura aos 135 MPa muito provavelmente devido à uniformidade de tensões conseguida. Aos 93MPa surge a primeira fissura (Figura 111) junto à travessa e a 1cm da face E3. Avaliando a forma como ocorreu a rotura esta poderá ter sido provocada por uma carga de faca mas de pouca relevância, que provocou a macro fissura que deu origem a dois pilares mais esbeltos. As extensões registadas indicam que provavelmente existia uma zona central mais solicitada (Figura 110).

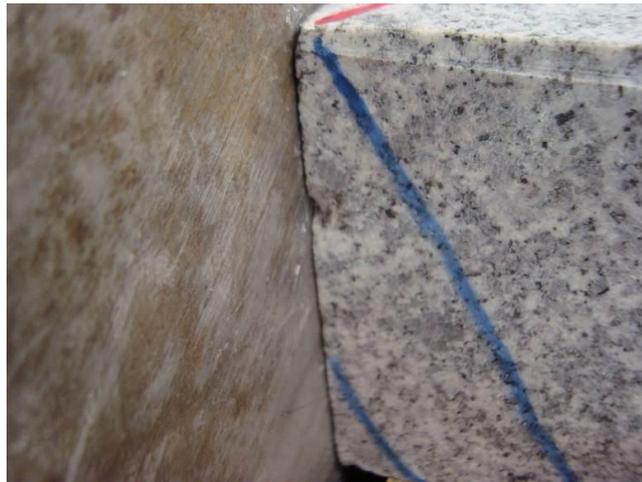


Figura 109 - Provete 6 - Contacto com as chapas (Face E1)

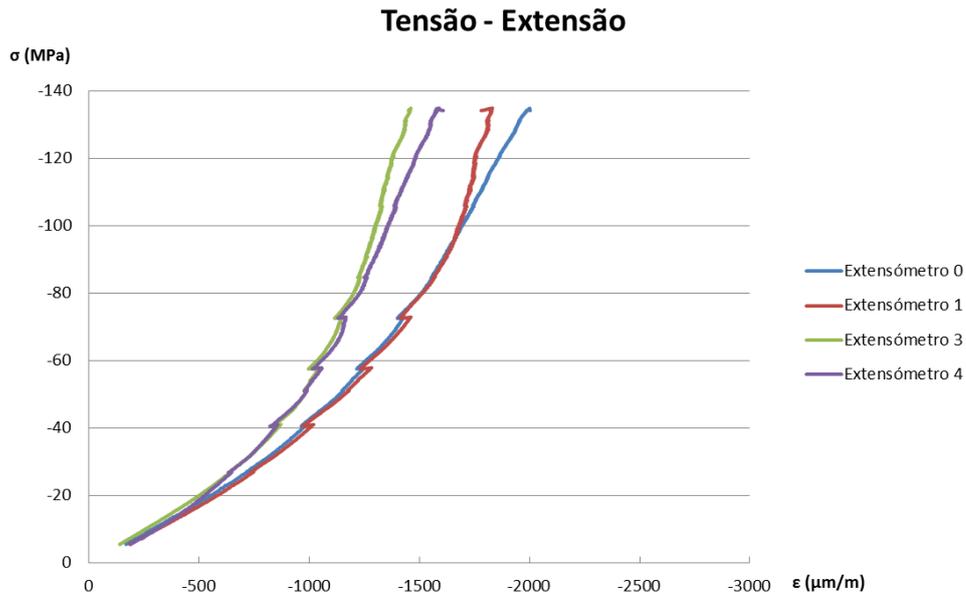


Figura 110 - Diagrama tensão-extensão do Provete 6

É visível o instante em que se forma a primeira fissura a aproximadamente 90 MPa em que as extensões se começam a afastar e por volta dos 100 MPa (Figura 110). O facto de terem sido registadas extensões nas faces E3 e E4 inferiores às das faces E0 e E1, pode ser indício de destacamentos parciais de material nas faces superior e inferior do provete. Como resultado da macro fissura central resultaram dois semi-pilares solicitados em compressão excêntrica em que as zonas mais comprimidas são as adjacentes à fissura. Aos 40 e 60 MPa existem oscilações provavelmente devidas ao surgimento de pequenas fissuras.



Figura 111 - Provete 6 - Vista da face E0 (macaco à direita)



Figura 112 - Provete 6 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

#### 6.5.2.5. Provete 4

Também muito resistente foi o provete 4. Surgiu a primeira fissura por a aproximadamente 90 MPa no fundo do provete e em quase toda a sua extensão provocando destaque de material entre as faces E1 e E4 e rotura muito explosiva aos 121 MPa a partir dessa zona (Figura 114). Observa-se que as juntas encostavam melhor na parte inferior do provete comprimindo-o mais nessa zona onde se iniciou a rotura (Figura 113). Devido a isso o ensaio acabou por iniciar com tracção nas faces E1 e E3 e terminou com diferenças entre as faces opostas muito grandes, resultando num ensaio com grande excentricidade (Figura 115).

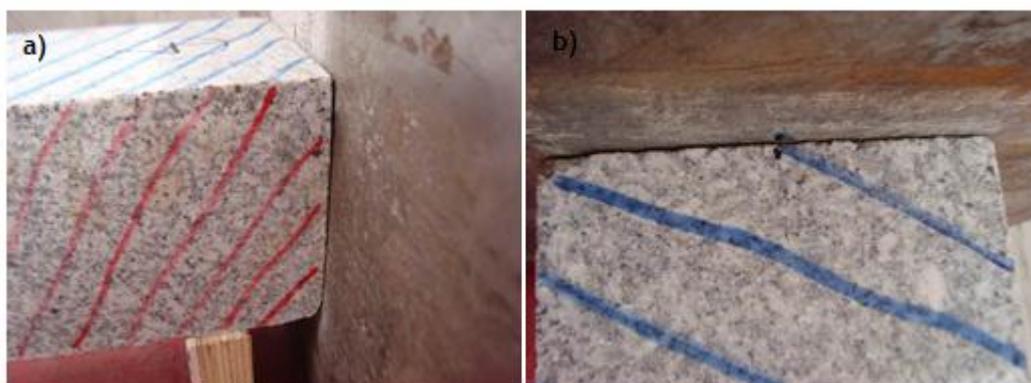


Figura 113 - Provete 4 - Contacto com as chapas de carga, vista da face E1 e E3 respectivamente



Figura 114 - Provete 4 - Início da Rotura (saída de pó da face E4 - macaco à esquerda)

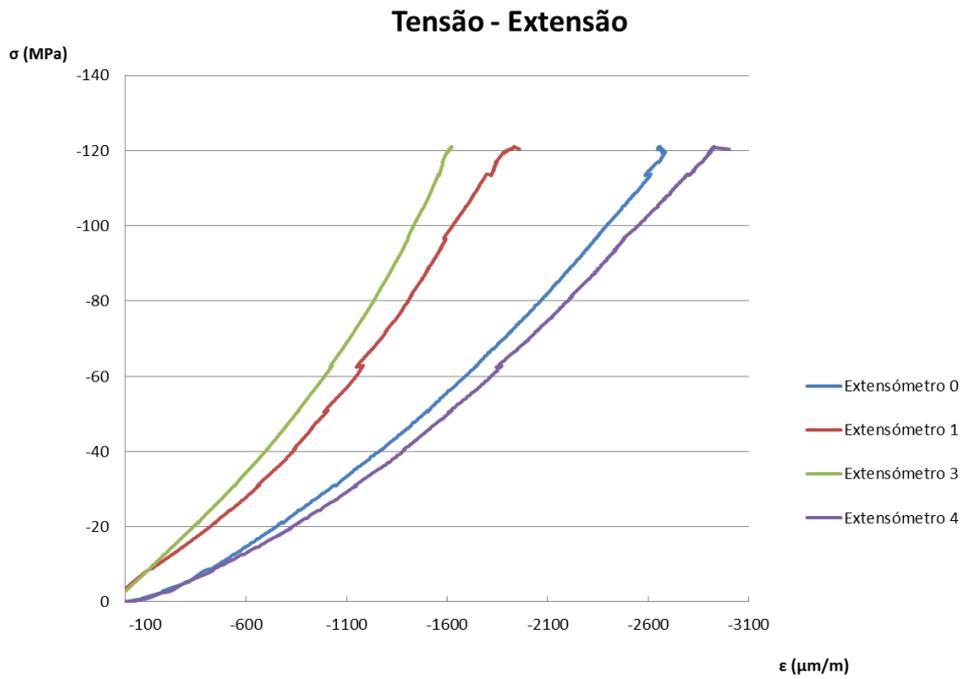


Figura 115 - Diagrama tensão-extensão do Provete 4



Figura 116 - Provete 4 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

#### 6.5.2.6. Provete 1

O provete 1 atingiu a rotura aos 96 MPa. Antes, aos 60 MPa ocorreu um destaque de material na face inferior próximo da travessa. Surgiu uma fractura nessa face junto ao macaco com desenvolvimento inicial semelhante ao de cunha que acabaria por se formar resultante de flexão oblíqua por consequência da forma como o provete encostava com a chapa (Figura 117). Posteriormente formaram-se fissuras quase paralelas à primeira cunha e essa fissuração provoca a rotura.



Figura 117 - Provete 1 - Contacto com a chapa de carga (Face E1)

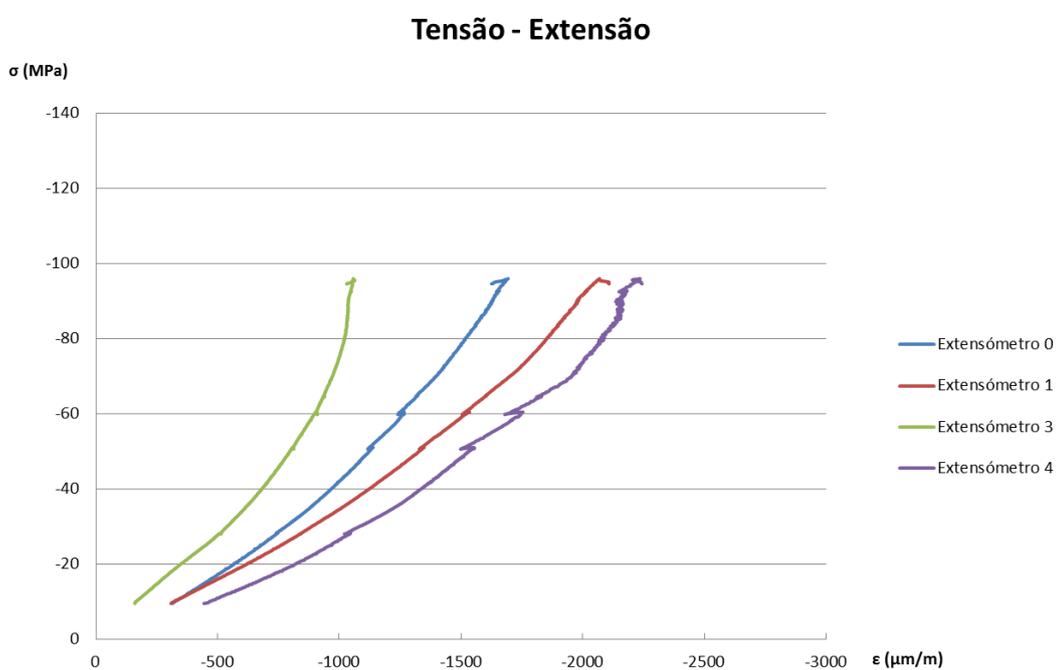


Figura 118 - Diagrama tensão-extensão do Provete 1

Analisando o diagrama tensão-extensão (Figura 118) observa-se mais uma vez a grande disparidade de extensões, principalmente entre E3 e E4. É identificável o destacamento aos 60 MPa pelas oscilações no diagrama e pelo facto de as extensões na face E3 partitamente estabilizarem aí devido ao aparecimento de fissuras.



Figura 119 - Provete 1 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

### 6.5.2.7. Provete 15

Também com uma resistência de 120 MPa, o provete 15 inicia a rotura com fissuração que provoca um destacamento de material de pequena espessura semelhante a uma lâmina por volta dos 92 MPa (Figura 121). O caminho das forças desviou-se mais para próximo da superfície inferior e provocou a queda de material dessa face fazendo diminuir a secção e o aparecimento de uma nova fissura longitudinal já durante a rotura onde a carga seria muito excêntrica nessa fase.

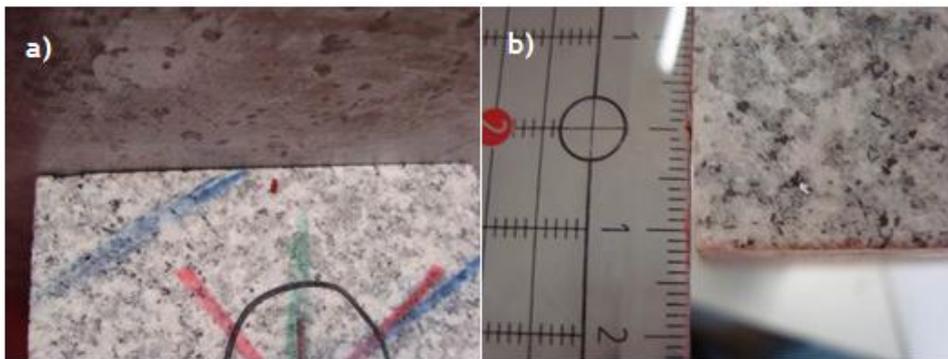


Figura 120 - Provete 15 - a) Contacto com chapa de carga (vista da face E3); b) Superfície defeituosa

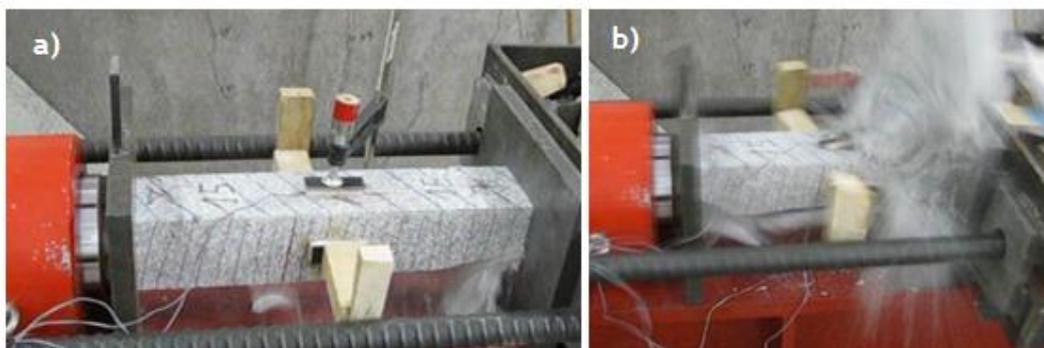
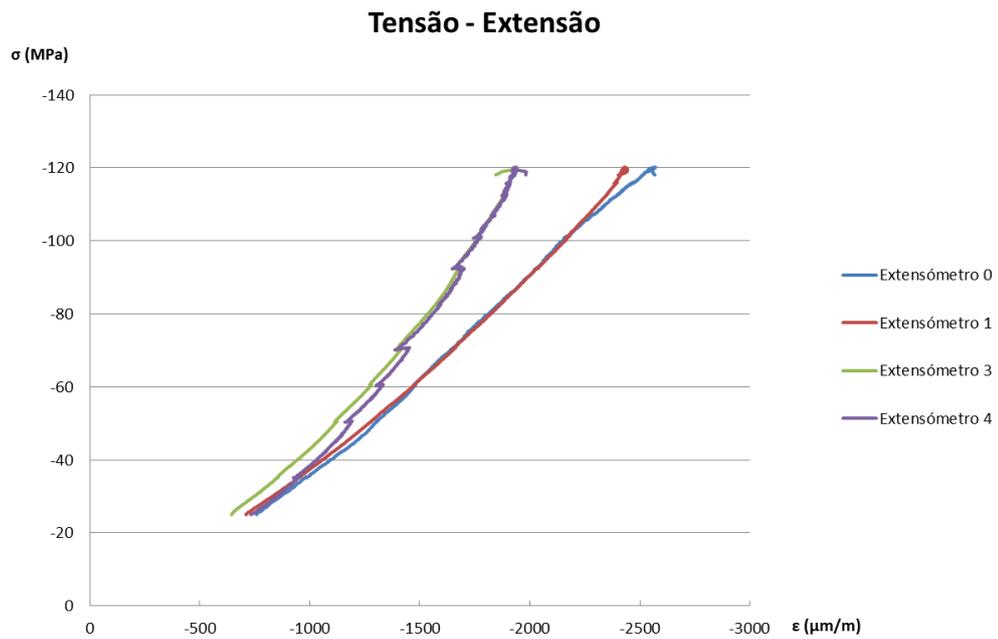


Figura 121 - Provete 15 - a) Primeiro destacamento de matéria (face E1), b) Rotura (Formação de microfissuras)



Observando o diagrama (Figura 122) observa-se que as inicialmente as extensões eram uniforme mas que aos 40 MPa começam a afastar-se apesar de entre faces opostas estas se manterem semelhantes, evidenciando que possivelmente a superfície seria um pouco côncava. O extensômetro 4 registou o destaque de material nessa face que é visível pelas oscilações que sofreu.



Figura 123 - Provete 15 - Vista da face E0 (macaco à direita)

#### 6.5.2.8. Provete 16

O provete 16 atingiu um nível de rotura semelhante (121 MPa). Em fase adiantada do carregamento começou a surgir o levantamento de material junto à travessa numa das arestas, surgindo uma fissura que continuou a desenvolver-se e a aumentar a quantidade de material que se destaca. Antes da rotura surge uma fissura e destacamento de material nas faces E3 e E0 (Figura 125) que provoca a rotura nessa zona devido ao afunilar do campo de

forças. A resultante das compressões fica excêntrica e aumentam as tensões. A meia altura do provete surge uma fissura longitudinal de onde se forma uma cunha que deslizou sobre o bloco e gerou muito pó. Surgem também fissuras em planos verticais provavelmente devidas à flexão do material restante, sob grande excentricidade.



Figura 124 - Provete 16 - a) Defeito da superfície; b) Contacto com chapa (face E3)



Figura 125 - Provete 16 - a) Sequência de rotura; b) Rotura (face E0 - macaco à direita)

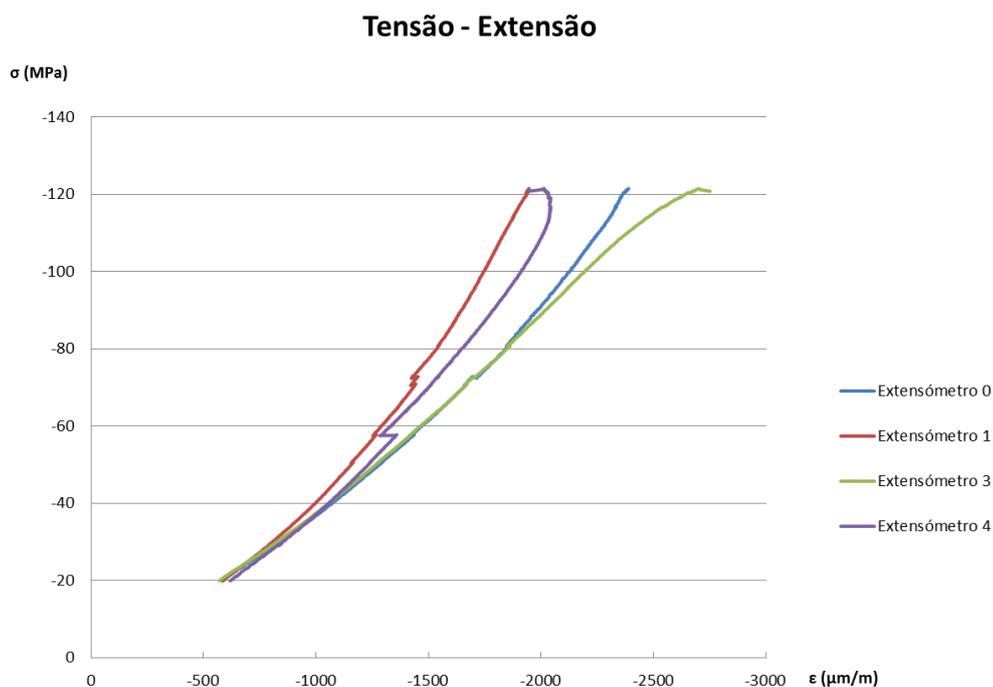


Figura 126 - Diagrama tensão-extensão do Provete 16

Mais uma vez o ensaio inicia-se com a carga a ser aplicada de forma bastante uniforme mas em que depressa a carga começa a ficar excêntrica especialmente devido aos destaques de material que foram ocorrendo e provocaram uma oscilação no diagrama aos 60 e 70 MPa (Figura 126).



Figura 127 - Provete 16 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

### 6.5.3. Provetes com juntas

Inicialmente o plano de ensaios previa a realização de dois tipos de juntas: juntas realizadas a disco e juntas realizadas a fio diamantado. Destes dois tipos de operação resultavam dois conjuntos de provetes com diferentes rugosidades. Com a realização dos ensaios anteriores verificou-se que os defeitos eram mais relevantes do que a rugosidade.

Foram apenas testados segundo o plano inicial os provetes 9 e 12 e os restantes foram cortados em cubos de 10x10x10 cm e as faces laterais (cortadas com disco diamantado) do provete original seriam agora as faces carregadas de cada um dos provetes. O processo não é perfeito e ainda assim existem imperfeições. Estes cubos foram colocados encostados uns sobre os outros e verificou-se a junta que formavam. Foram por isso divididos em 3 grupos consoante o movimento (rotação) relativo entre os cubos que a junta permitia:

- Provetes com junta de boa qualidade (bom encosto das superfícies e sem movimentos de rotação relativa entre blocos);
- Provetes com junta de qualidade intermédia (encosto parcial das superfícies e com reduzidos movimentos de rotação relativa entre blocos);
- Provetes com junta de má qualidade (encosto parcial e com movimentos de rotação relativa entre blocos).

#### 6.5.3.1. Provete 12

O primeiro provete a ser testado foi o provete 12 que tinha apenas uma junta e atingiu apenas os 75MPa. Na rotura, as extensões medidas eram muito inferiores às esperadas. A face mais carregada (E1) tinha uma extensão de 1686  $\mu\text{m}/\text{m}$  correspondente a aproximadamente 85 MPa. As diferenças entre faces opostas eram de aproximadamente 500  $\mu\text{m}/\text{m}$  (25MPa), tanto entre a E0 e E1 como para a E3 e E4. A rotura iniciou-se com a formação de fissuras induzidas pela junta próximas da face inferior (E4) (aos 40 MPa destacaram-se algumas peças compactas). Estas fissuras progrediram e provocaram o destacamento de peças compactas, provocando a destruição da face inferior próximo á junta. O provete rompe e neste momento surgem fissuras axiais num plano superior do qual é possível visualizar a saída de pó (Figura 129).

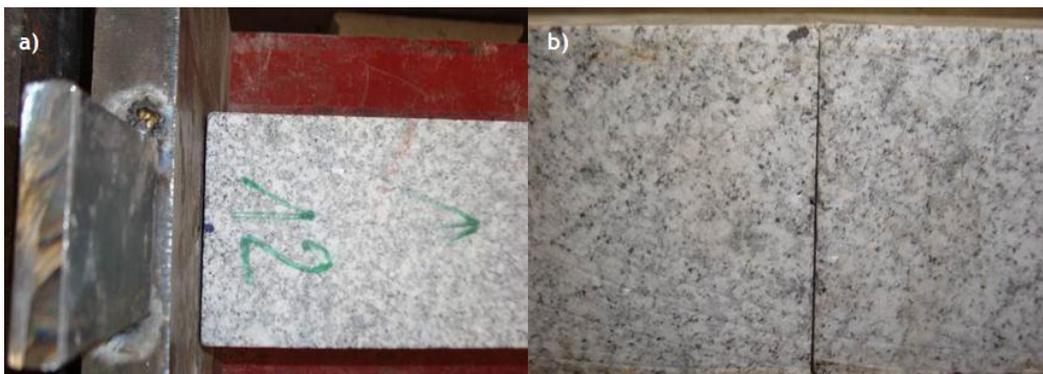


Figura 128 - Provete 12 - a) Contacto com chapa de carga; b) Junta (face E1)



Figura 129 - Provete 12 - Rotura (face E0 - macaco à direita)

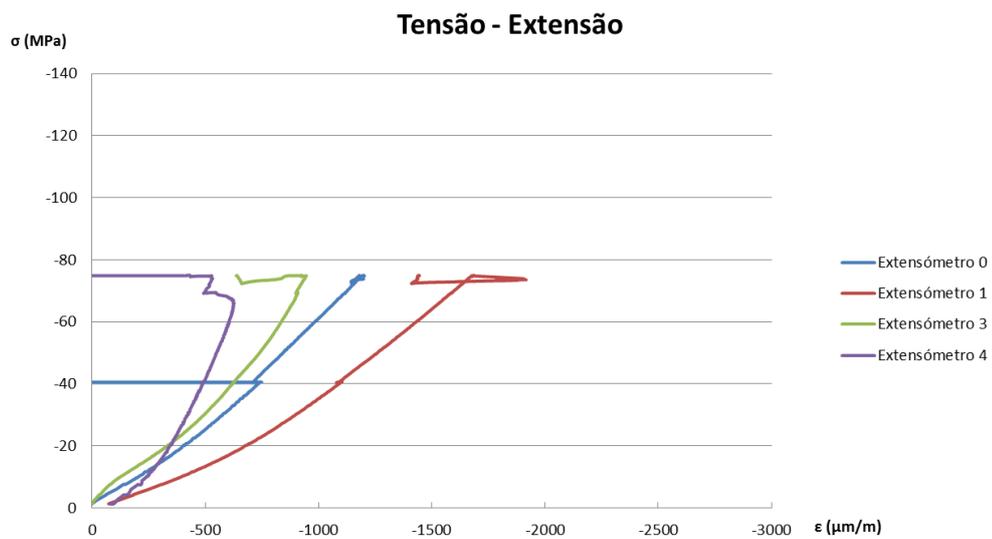


Figura 130 - Diagrama tensão-extensão do Provete 12

O destacamento de peças aos 40 MPa é visível no diagrama (Figura 130) e produziu erros numéricos no extensómetro E0. No instante da rotura as fissuras que surgiram fazem as extensões diminuir e surgem erros numéricos no extensómetro E4.



Figura 131 - Provete 12 - Vista da face E1 (traços vermelhos) (macaco à esquerda)

### 6.5.3.2. Provete 9

O provete 9 foi um caso semelhante. Atingiu a rotura aos 78 MPa mas desta vez as diferenças de extensões entre faces opostas eram muito maiores, já que a diferença entre as faces E0 e E1 era de 700  $\mu\text{m}/\text{m}$  (35 MPa) e entre a E3 e E4 de 1900  $\mu\text{m}/\text{m}$  (95MPa). A face mais carregada era a E4 e atingiu a rotura com 2319  $\mu\text{m}/\text{m}$  (116 MPa) e nesse instante a excentricidade era grande de tal forma que a face E3 estava carregada apenas com 21MPa, ou seja a resultante das compressões estaria já muito próxima da fronteira do núcleo central (1,66 cm do centro do provete). Surgiu a primeira fissura na parte inferior e fissuras axiais com progressão a partir da junta para ambos os lados e dá-se a rotura na face superior devido à compressão (Figura 133).



Figura 132 - Provete 9 - Junta (face E1)



Figura 133 - Provete 9 - Rotura (face E1)

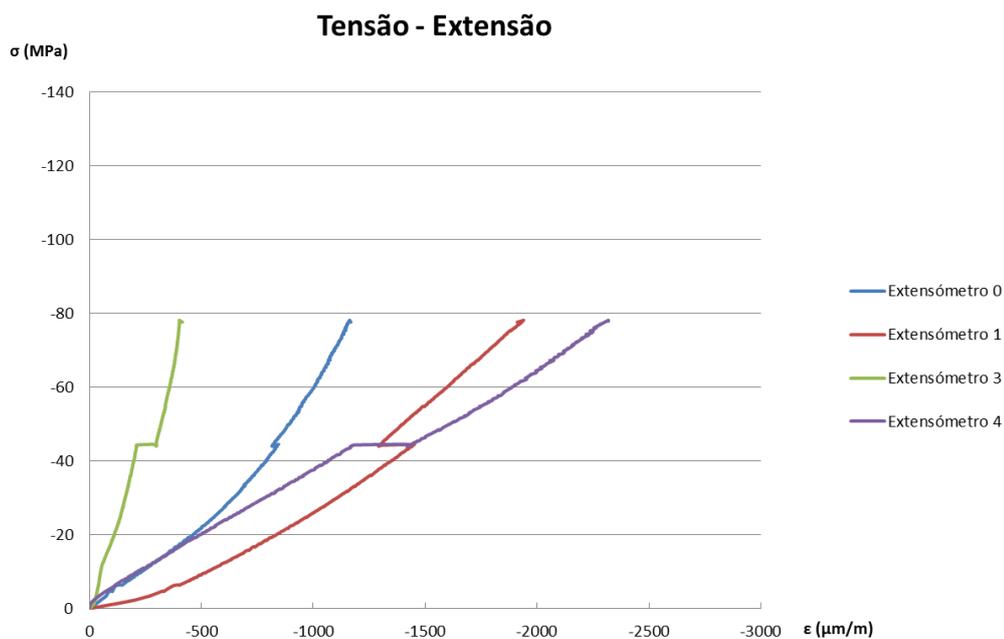


Figura 134 - Diagrama tensão-extensão do Provete 9

As primeiras fissuras devem ter surgido aproximadamente aos 45 MPa porque as extensões nesse instante sofreram uma variação significativa que é visível no diagrama (Figura 134).



Figura 135 - Provete 9 - Vista da face E0 (macaco à direita)

### 6.5.3.3. Provete 7

O provete 7 é o primeiro constituído por 5 cubos (4 juntas granito/granito) (Figura 136) e atingiu os 116MPa, valor muito próximo dos obtidos com provetes inteiros. As diferenças entre as faces opostas eram de 1000 μm/m (50 MPa), sendo a mais carregada no instante da rotura a face 3 com 2206 μm/m.

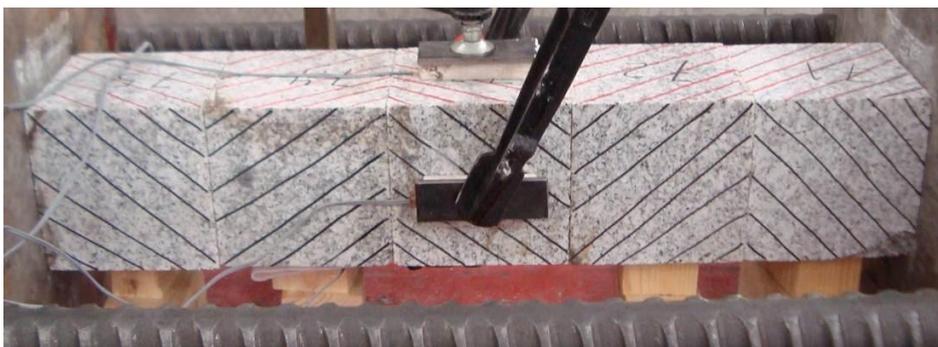


Figura 136 - Provete 7 - Montagem do provete 7

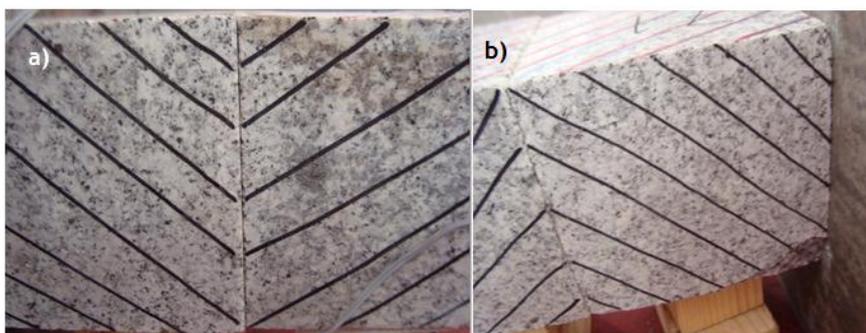


Figura 137 - Provete 7 - Juntas

Por observação do vídeo verificou-se que a fissuração se iniciou junto às chapas (micro-fissuração) devido à rugosidade inicial das chapas que eventualmente tinham incrustações de grãos duros de outros ensaios (Figura 138). Isto não é compatível com a distribuição de tensões medidas, mas o processo de micro-fissuração pode passar despercebido aos extensómetros pois ocorreu junto às chapas e de forma localizada. O processo de rotura iniciou com perda de material na face E1 e terminou quando rompeu a face E3 que era a mais carregada.

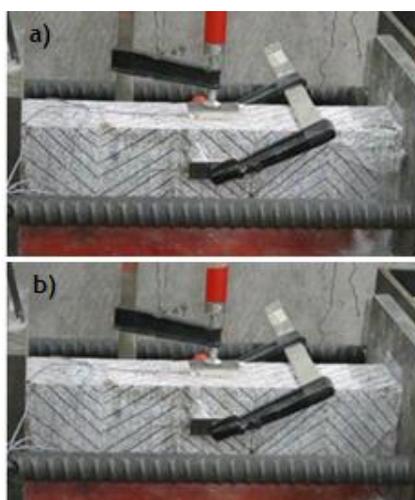


Figura 138 - a) Destacamento de material; b) Início da rotura (face E1)

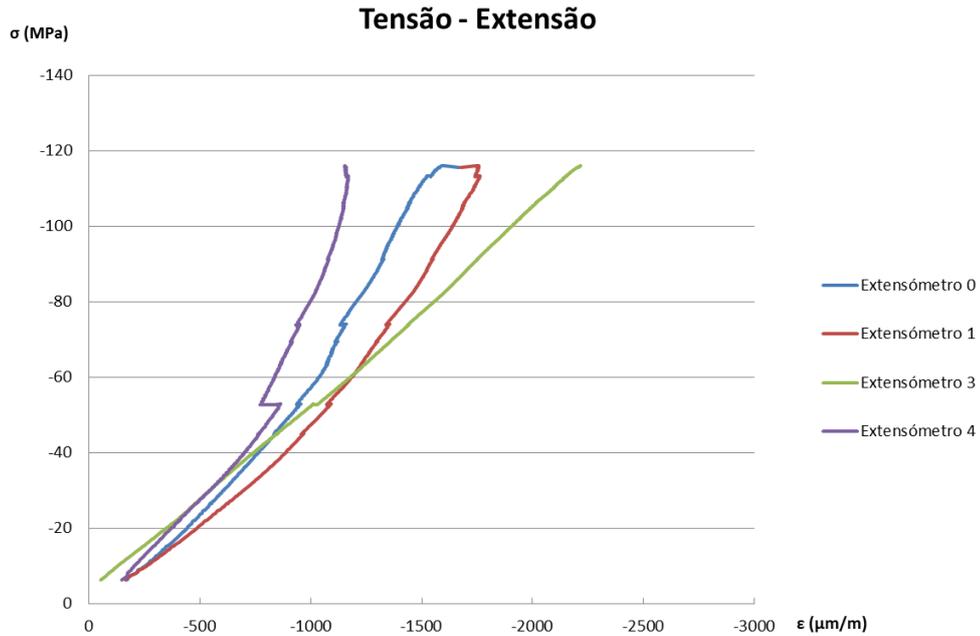


Figura 139 - Diagrama tensão-extensão do Provete 7

Os primeiros ruídos audíveis correspondem à aresta a desfazer a 84 MPa e a rotura não acontece nas juntas entre os provetes. Antes, aos 55 MPa o diagrama apresenta várias oscilações (Figura 139) provavelmente devido ao início da fissuração nessa zona. As extensões eram bastante superiores na face E3 o que implica que o provete era mais carregado na face inferior. Conclui-se que com juntas bem executadas se consegue atingir uma perda de resistência muito pouco significativa. As chapas foram as responsáveis pela destruição.



Figura 140 - Provete 7 - Vista da face E0 (riscos a verde) (macaco à direita)

#### 6.5.3.4. Provete 8

Com características semelhantes, o provete 8 atingiu a rotura aos 102 MPa. Novamente a distribuição de tensões não era uniforme. Neste ensaio colocaram-se mais duas chapas de 10mm de espessura para evitar que as chapas usadas anteriormente tivessem influência, mas o ensaio acabou por ser condicionado por elas já que acabaram por deformar e ficaram

côncavas aplicando o inverso uma carga de faca que foi determinante. O material começou a ser destruído na face E1 (local onde as tensões máximas não eram as maiores). Surgiram microfissuras paralelas a plano vertical (Figura 142). As juntas não tiveram qualquer influência visto as chapas terem o papel determinante.



Figura 141 - Provete 8 - Montagem do provete



Figura 142 - Provete 8 - Início da rotura (face E1)

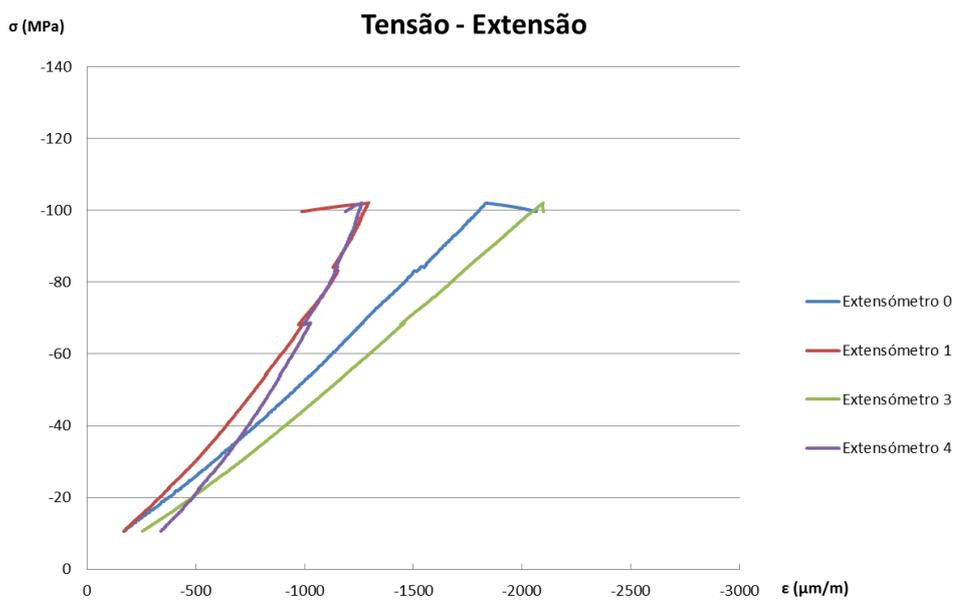


Figura 143 - Diagrama tensão-extensão do Provete 8

As extensões registadas no diagrama (Figura 143) eram pouco excêntricas no início mas estas excentricidades foram aumentando de tal forma que as faces menos carregadas passaram a ser as mais carregadas devido provavelmente ao movimento do provete, sendo que o extensómetro E3 foi o único que se manteve proporcional. Os restantes devido ao problema das chapas e da sua própria geometria viram a posição da resultante das compressões mudar significativamente de posição. As chapas começaram a carregar mais nas extremidades e passaram a carregar mais no meio aplicando uma carga tipo “faca”. Os primeiros ruídos surgiram aos 70 MPa e são condizentes com a primeira oscilação do diagrama. Foram gerados pelo abrir das esquinas.



Figura 144 - Provete 8 - Vista da face E3 (macaco à esquerda)

#### 6.5.3.5. Provete 10

No grupo das juntas intermédias o primeiro a ser testado foi o provete 10 (apenas com 4 cubos) que atingiu a rotura aos 125 MPa e novamente durante a rotura a distribuição de tensões não era uniforme. O processo de rotura iniciou-se com a progressão de fissuras e formação de cunhas junto às placas. Neste caso a transição entre blocos pode ter alguma relevância e deu origem a peças de menor dimensão e anteriores à rotura devido à diferente dimensão dos cubos (a aproximadamente 115MPa). A maior destruição ocorre entre as faces E0 e E1 onde as extensões são mais distantes. Visualiza-se a formação de cunha e a formação de uma fractura a partir da placa de carga e mais uma vez as juntas não tiveram influência.

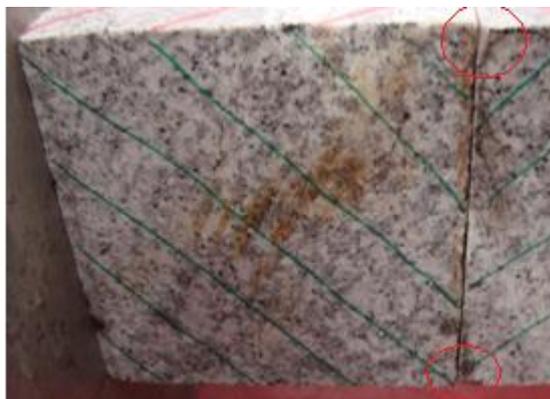


Figura 145 - Provete 10 - Pormenor de junta da face E0 e E3. Arestas com diferentes dimensões

NOTA: os extensómetros foram colocados junto à placa devido às outras faces serem demasiado rugosas e provocarem o enrugamento dos extensómetros, dando origem a leituras erradas.



Figura 146 - Provete 10 - a e b) Início da rotura (face E1)

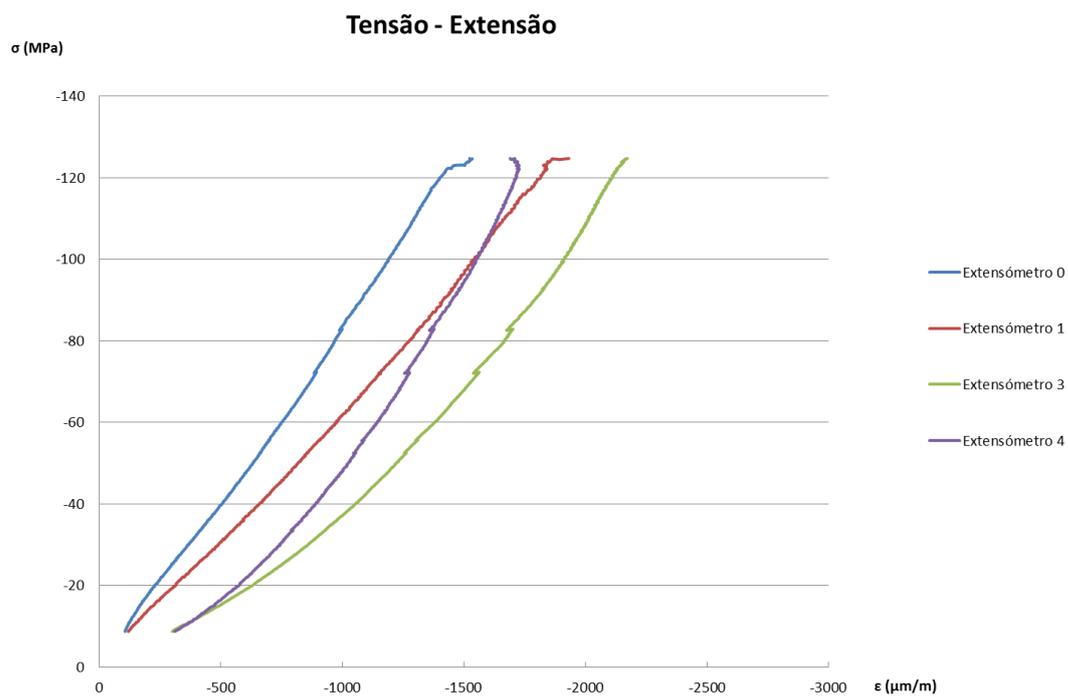


Figura 147 - Diagrama tensão-extensão do Provete 10

O diagrama (Figura 147) mostra um andamento quase linear das extensões e com poucas oscilações o que revela que surgiram fissuras de pequena importância para o equilíbrio (a aproximadamente 80 MPa) sendo apenas perceptível na fase final o surgimento de

microfissuração devido ao contacto com as chapas. O destacamento de material na face superior (E3) devido às diferentes dimensões dos provetes é perceptível apenas no extensómetro E1 já que depois do destaque de material (Figura 146) é possível manter o equilíbrio sem que tenha de aparecer mais fissuras.



Figura 148 - Provete 10 - Vista da face E4 (traços pretos) (macaco à esquerda)

#### 6.5.3.6. Provete 11

O provete 11 também era constituído apenas por 4 cubos e atingiu a rotura aos 107 MPa. Nesse instante a diferença de tensão entre faces opostas era de 20MPa, ou seja o ensaio era algo excêntrico ao contrário do que se passava no início do carregamento em que as tensões eram semelhantes entre as faces que se opõem.



Figura 149 - Provete 11 - Junta (face E3)

A rotura iniciou-se com a formação de cunhas junto da travessa o que provoca a mudança de posição da resultante do caminho de forças de tal forma que origina a rotura por tracção e surge uma macrofractura nos provetes interiores (Figura 150). Na filmagem é possível ver a rotação da cunha devido à pressão lateral no plano de fractura. A fissura que dá origem à cunha poderá ter-se formado no interior e não nas arestas. Formam-se também fissuras junto à placa de carga que atravessaram grãos de Feldspato.

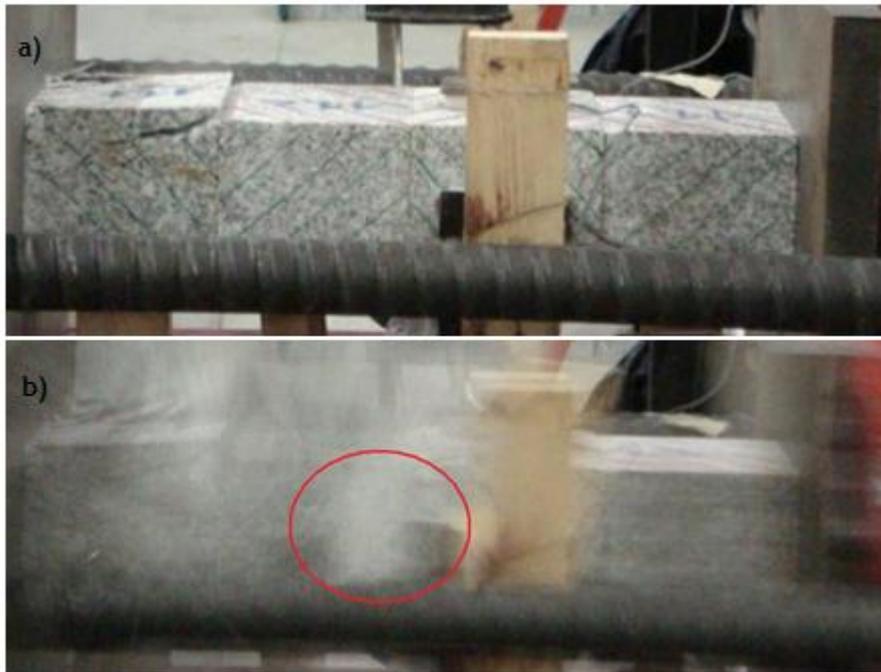


Figura 150 - Provete 11 - a) Início da rotura; b) Saída de pó (face E0 - macaco à direita)

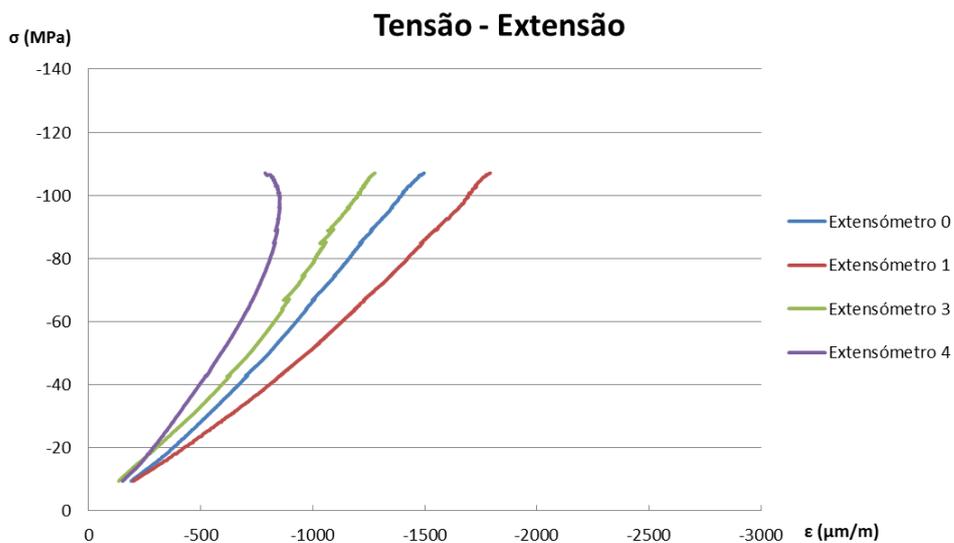


Figura 151 - Diagrama tensão-extensão do Provete 11

O ensaio inicia com pouca excentricidade mas que devido às juntas e aos ajustes dos provetes aumentou sendo visível já na fase final do diagrama (Figura 151) do ensaio que a partir dos 80 MPa o extensômetro 4 começa a registar extensões inferiores às que já possuía anteriormente. Essa situação pode ter conduzido o provete à rotura para um nível de extensão relativamente baixo. Os primeiros ruídos provenientes de fissuras foram audíveis aos 70 MPa e ficaram registados no diagrama.



Figura 152 - Provete 11 - Vista da face E1 (macaco à esquerda)

### 6.5.3.7. Provete 13

O último grupo a ser ensaiado foi o grupo dos provetes com junta fraca começando pelo provete 13 atingiu apenas os 65 MPa. Na fase inicial as extensões não eram muito díspares mas com os ajustes e deformações que o provete sofre depressa esta situação se altera e na rotura a diferença entre E3 (mais carregada) e E4 era de 50 MPa (Figura 154). No momento da rotura a face E3 registava apenas a tensão de 81 MPa.



Figura 153 - Provete 13 - Junta (face E3)

Deste ensaio não existe filmagem disponível porque a rotura aconteceu a um nível de carga baixo e sem pré-aviso porque o provete não emitiu quaisquer ruídos antes da rotura que aconteceu na face E3. Os primeiros ruídos surgiram aos 60 MPa e correspondem ao início da rotura. O provete 13.1 (Figura 153) tinha uma das faces curvilínea e a carga estaria a ser aplicada de forma pontual. Devido a isso surgiu uma cunha e houve destacamento de material de grandes dimensões no fundo devido à presença de uma fissura longitudinal.

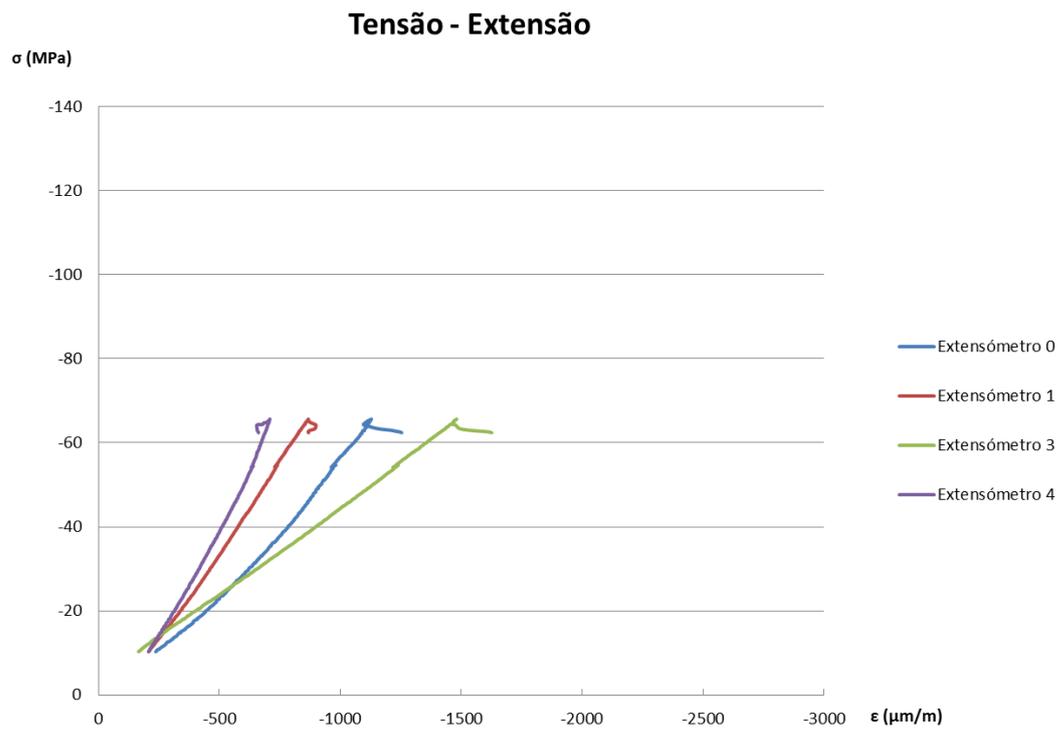


Figura 154 - Diagrama de tensão-extensão do Provete 13

O diagrama do provete 13 (Figura 154) revela um crescimento quase linear das extensões mas com elevadas excentricidades e diferenças entre as extensões E3 e E4. No final do ensaio é registado um patamar horizontal talvez correspondente a um processo de destruição lenta.



Figura 155 - Provete 13 - Após rotura (face E0 e E3 - macaco à direita)



Figura 156 - Vista da face E0 (macaco à direita)

#### 6.5.3.8. Provete 14

O provete 14 atingiu a rotura aos 72 MPa e com extensões baixas. Aliás a face E0 tinha uma tensão de 18,5 MPa ( $370\mu\text{m}/\text{m}$ ) e chegou a registar 20MPa ( $400\mu\text{m}/\text{m}$ ) aos 51MPa (para tensão uniforme) e no início dos registos 15 MPa ( $276\mu\text{m}/\text{m}$ ) (Figura 159). Nessa fase as tensões entre faces opostas eram semelhantes e a média rondava os  $300\mu\text{m}/\text{m}$  e a face E0 na rotura já tinha experimentado tensões superiores que pode ser causa de nos momentos de afinações do provete, para tentar garantir a distribuição mais uniforme possível das tensões, surgiu uma fissura a 3,5cm da face E1 do bloco 14.2 (Figura 157). Apesar disso não foi muito condicionante porque não progrediu.

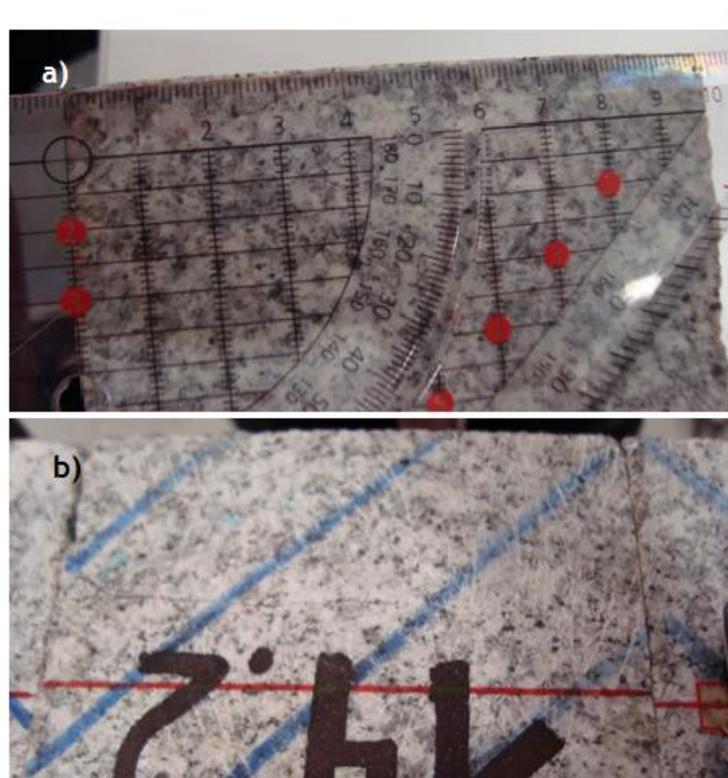


Figura 157 - Provete 14 - a) Defeito da superfície; b) Fissura a 3,5 cm da face

A rotura inicia-se com uma fissura na face superior junto à aresta com a face E1 (Figura 158). O caminho das forças afastasse da sua posição inicial e provoca fissuras por tracção nos provetes seguintes. Observou-se pó nas fissuras longitudinais (fricção) que existia em grande quantidade no cubo 14.2 que foi o que sofreu mais estragos e já possuía uma fissura que permaneceu intacta após a rotura.



Figura 158 - Provete 14 - Rotura (face E1)



Figura 159 - Diagrama tensão-extensão do Provete 14

É visível aos 65 MPa uma oscilação no diagrama (Figura 159) correspondente aos primeiros ruidos emitidos pela abertura de fissuras. O ensaio é muito excêntrico e mais uma vez as extensões na rotura não são as esperadas nessa fase, sendo a da face E0 muito baixa. Esta face apresentou valores de extensão quase constantes devido provavelmente a movimentos das juntas e do fenómeno de *spalling* ocorrido nessa face do provete 14.2.



Figura 160 - Provete 14 - Vista da face E0 (macaco à esquerda)

## 6.6. Discussão dos resultados obtidos

A Tabela 13 sintetiza os resultados da tensão de rotura, o mecanismo de rotura e a respectiva causa de todos os ensaios.

Tabela 13 - Síntese dos ensaios realizados.

Provete	Nº de juntas	Descrição das juntas	$\sigma_{rotura}$ (MPa)	Mecanismo de rotura	Causa
1	0	-	96	Formação de cunha numa das extremidades. Ensaio com excentricidade desde o início.	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço
2	0	-	70	Macrofissuras longitudinais no eixo do provete	Superfície de encosto com curvatura. Carga concentrada “pontual”
3	0	-	99	Destruição junto às chapas. Perda de material explosiva. Formação de cunhas. Excentricidade muito elevada.	Superfície plana e inclinada.
4	0	-	121	Destacamento numa das faces. Rotura Explosiva	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço
5	0	-	123	Destruição junto às chapas. Fissuras Longitudinais.	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço
6	0	-	135	Formação de macrofissura. Rotura sub-pilares	Carga de faca. Tensões relativamente uniformes
7	4	Bom desempenho	116	Microfissuração. Elevada excentricidade	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço
8	4	Bom desempenho	102	Macro fissura axial. Elevada excentricidade	Chapas côncavas.

Provete	Nº de juntas	Descrição das juntas	$\sigma_{rotura}$ (MPa)	Mecanismo de rotura	Causa
9	1	Superfícies inclinadas e com curvatura	78	Fracturas induzidas pela junta.	Superfície de encosto com curvatura
10	3	Arestas de dimensões diferentes Contacto imperfeito	125	Formação de cunhas a partir da chapa	Diferentes dimensões. Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço
11	3	Arestas de dimensões diferentes Contacto imperfeito	107	Formação de cunhas. Macrofissura nos provetes interiores devido a carga tipo faca aplicada pelo provete 11.1	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço.
12	1	Superfícies inclinadas e com curvatura	75	Fracturas induzidas pela junta.	Superfície de encosto com curvatura. Carga concentrada “pontual”
13	3	Planos não coincidentes. Muito imperfeitos	65	Elevada excentricidade. Carga pontual	Face curvilínea (provete 13.1)
14	3	Planos não coincidentes. Muito imperfeitos	72	Elevada excentricidade	Superfície irregular de encosto e com curvatura
15	0	-	120	Destaque de material junto à chapa	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço
16	0	-	121	Perda de material junto à chapa e perda de material na aresta. Elevada excentricidade	Efeito de cintagem devido à rigidez transversal da placa de aço

Verificou-se que o defeito mais prejudicial e condicionante no tipo de rotura são as superfícies serem curvilíneas e por consequência disso a carga é transmitida de forma pontual. Este tipo de rotura ocorre precocemente para valores de aproximadamente 75MPa, ou seja 60% da capacidade resistente. Neste tipo de rotura os primeiros indícios de rotura são geralmente o surgimento de microfissuras em quase todo o comprimento do provete, a aproximadamente metade do valor da tensão de rotura. Esta microfissura acaba por dividir o provete em vários sub-pilares que irão ceder devido à flexão que lhes é imposta. Neste tipo de rotura não é visível o surgimento de pó indicador do deslizamento das superfícies.

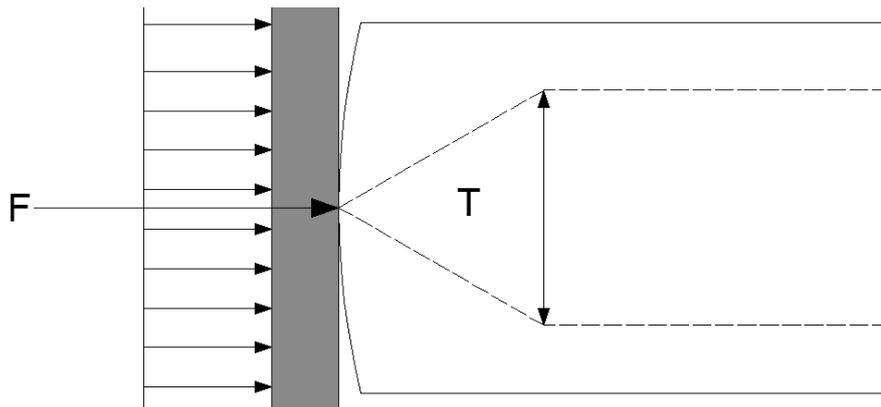


Figura 161 - Efeito de carga pontual

O outro defeito mais comum é a falta de ortogonalidade entre as faces do provete. Para além de o pilar resultante perder a verticalidade as cargas são transmitidas com excentricidade. A flexão que é imposta ao provete introduz maiores compressões numa das faces provocando a rotura para níveis de tensão inferiores à tensão resistente do material. A rotura acontece por esmagamento da face mais comprimida e destacamento de material. Neste tipo de rotura é comum o surgimento de cunhas devido também ao efeito de cintagem que as chapas proporcionam. As chapas possuem também rugosidade que foi aumentando com o desenrolar dos ensaios pois alguns grãos de Quartzo ficavam cravados na chapa apesar de esta ser muito mais rígida que o Quartzo. Esta rugosidade é também preponderante na rotura porque causa microfissuras no provete que iniciam o processo de rotura. A rotura quando influenciada pela rugosidade das chapas começa a manifestar-se em níveis de tensão de 50 a 60% da capacidade resistente. Quando os níveis de extensão são muito díspares entre si (na ordem do dobro entre si) a rotura ocorre precocemente sem que nenhuma das faces atinja a tensão de rotura esperada. Quando os deslocamentos relativos entre faces opostas da fissura são desta ordem de grandeza existirá muito atrito interno entre os grãos que constituem o material e no momento em que essa resistência é vencida existe uma grande libertação de energia que se manifesta com a rotura do provete. A face mais carregada começará a microfissurar e iniciará a rotura por *spalling* nessa zona, o que conduzirá à rotura do provete para valores de extensão inferiores aos esperados.

# Capítulo 7

## Análise de resultados

Após a análise numérica e experimental segue-se a análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais e que carecem de uma análise. O objectivo deste capítulo é determinar o valor de dimensionamento com base numa tensão característica do granito e na influência dos defeitos no mecanismo de rotura.

Os dados foram analisados tendo em conta as características dos provetes e o tipo de defeito que possuíam sendo agrupados em provetes sem juntas, provetes com juntas e posteriormente em função da causa da rotura, mais especificamente superfícies de encosto com curvatura, falta de ortogonalidade e cintagem devido às chapas. Nestes grupos foram calculados a média aritmética, o desvio padrão e a tensão de rotura característica que é definida pelo valor que é inferior em apenas 5% dos casos que constituem a população, ou seja o percentil de 5%.

### 7.1. Determinação dos parâmetros estatísticos

#### 7.1.1. Provetes sem juntas

Os provetes sem junta foram analisados considerando todos os ensaios e considerando apenas aqueles em que os defeitos não foram relevantes em que se atingiram tensões de rotura de aproximadamente 120 MPa (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes sem junta

Provetes sem junta		
Provete	Tensão de rotura $\sigma_r$	Média (MPa)
1	96	110,63
2	70	
3	99	Desvio Padrão
4	121	20,87
5	123	
6	135	Tensão característica $\sigma_{rk}$ (MPa)
15	120	79,1
16	121	

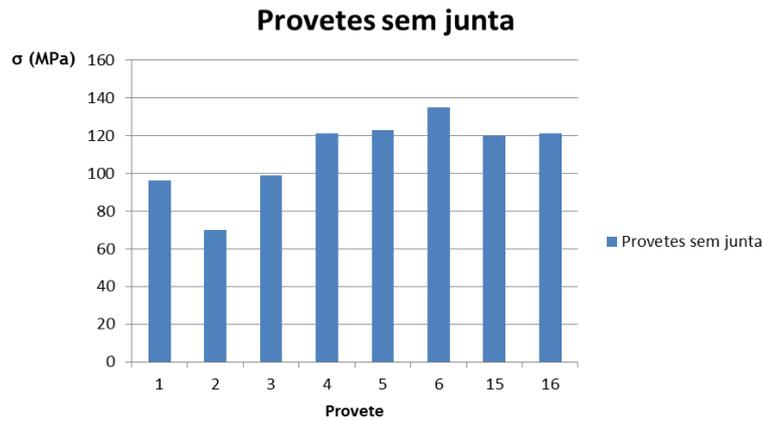


Figura 162 - Distribuição de tensões de rotura para provetes sem junta

Observando o valor do desvio padrão (Tabela 14) e a distribuição das tensões atingidas (Figura 162) verifica-se que existe uma grande dispersão de resultado devido principalmente à diferença entre o provete 2 e o provete 6. O provete 2 teve uma rotura provocada por uma carga concentrada pontual resultado de uma superfície de encosto com curvatura que é o defeito que mais diminui a resistência (Tabela 18). Os provetes 1 e 3 têm valores semelhantes porque romperam devido ao mesmo defeito (falta de ortogonalidade) acontecendo o mesmo com os provetes 5,6,15 e 16 (cintagem devido à rigidez transversal da chapa).

Tabela 15 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes sem junta (com defeitos pouco relevantes)

Provetes sem junta (com defeitos pouco relevantes)		
Provete	Tensão de rotura $\sigma_r$	Média (MPa)
4	121	124
5	123	<b>Desvio Padrão</b>
6	135	6,24
15	120	<b>Tensão característica <math>\sigma_{rk}</math> (MPa)</b>
16	121	120,2

Excluindo o conjunto de provetes que atingiu menor resistência devido a defeitos mais preponderantes verifica-se que a tensão resistente característica deste granito é de aproximadamente 120 MPa.

### 7.1.2. Provetes com juntas

Neste grupo foram incluídos os restantes provetes independentemente do número de juntas ou do defeito que possuíam.

Tabela 16 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com junta

Provetes com junta		
Provete	Tensão de rotura $\sigma_r$	Média (MPa)
7	116	92,25
8	102	
9	78	Desvio Padrão
10	125	22,51
11	105	
12	75	Tensão característica $\sigma_{rk}$ (MPa)
13	65	67,45
14	72	

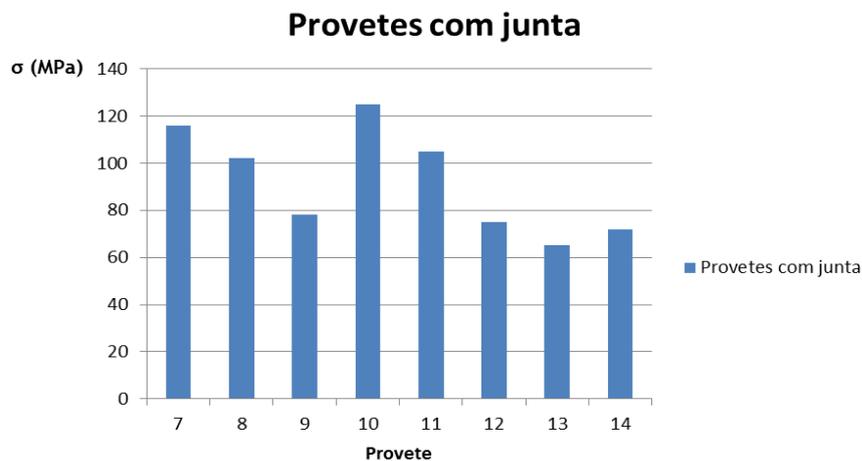


Figura 163 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com junta

A Tabela 16 revela que existe grande dispersão dos resultados e isso deve-se principalmente devido ao facto de esta análise incluir provetes com juntas de qualidade muito diferente. Os provetes com juntas de má qualidade (9,12,13 e 14) atingiram tensões semelhantes mas mais baixas quando comparadas com as atingidas pelos provetes com junta de qualidade superior. Aliás o provete que atingiu a maior tensão foi o provete 10 que tinha uma junta de qualidade intermédia mas em que as deformações que a junta sofreu permitiram ajustar o contacto entre provetes e a rotura acabou por ser condicionada pela cintagem na extremidade.

### 7.1.3. Análise por defeito

Após o estudo da influência das juntas na capacidade resistente segue-se a análise da importância dos vários defeitos na resistência dos provetes com e sem junta. Pretende-se assim avaliar qual a perda de capacidade resistente provocada por cada defeito comparativamente com a capacidade resistente.

### 7.1.3.1. Falta de Ortogonalidade

A falta de ortogonalidade introduz excentricidade no carregamento nos provetes e aplica flexão composta nos mesmos causando o esmagamento de uma das faces.

Tabela 17 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com falta de ortogonalidade

Provetes com junta		
Provete	Tensão de rotura $\sigma_r$	Média (MPa)
1	96	103,25
3	99	Desvio Padrão
7	116	8,85
8	102	Tensão característica $\sigma_{rk}$ (MPa)
		96,45

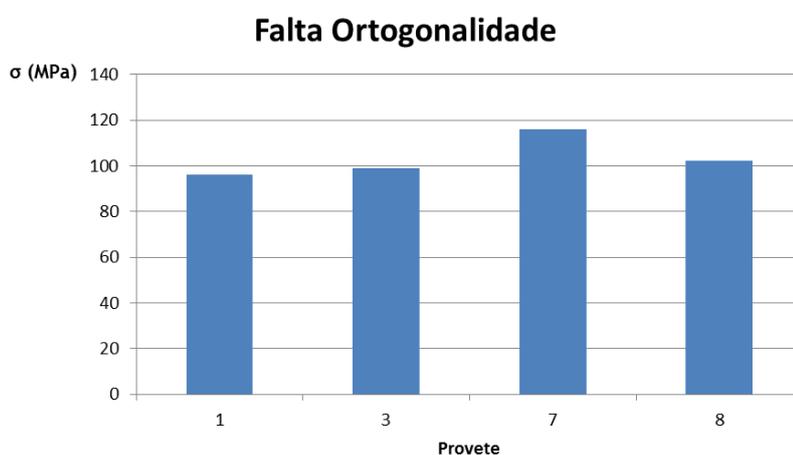


Figura 164 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com falta de ortogonalidade

Os valores obtidos (Tabela 17) têm pouca dispersão e o valor da tensão característica  $\sigma_{rk}$  é de 96,45 MPa. Comparativamente ao valor da tensão resistente característica do granito (Tabela 15) significa uma redução de 20%. A presença deste defeito não exclui que antes da rotura não se possa ter iniciado o processo de cintagem que pode acelerar o processo de destruição, apesar de este ser o fulcral.

### 7.1.3.2. Superfície de encosto com curvatura

Uma superfície de contacto com curvatura é responsável pela transmissão de força de forma concentrada pontualmente sendo a rotura típica o surgimento de microfissura(s) no alinhamento do ponto de aplicação dessa força.

Tabela 18 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com superfície de encosto com curvatura

Provetes com junta		
Provete	Tensão de rotura $\sigma_r$	Média (MPa)
2	70	72
9	78	Desvio Padrão
12	75	4,95
13	65	Tensão característica $\sigma_{rk}$ (MPa)
14	72	66

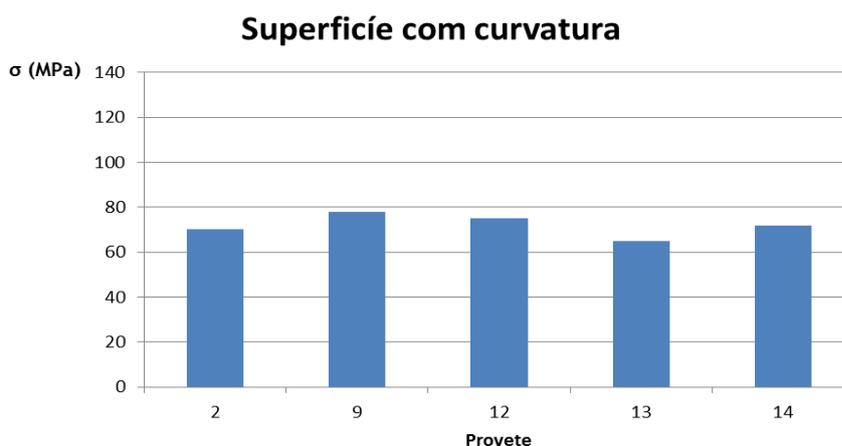


Figura 165 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com superfície de encosto com curvatura

A tensão característica obtida é de 66 MPa (Tabela 18) e em comparação com a tensão resistente característica significa um decréscimo de 45% na capacidade resistente. Apesar de apenas um provete inteiro ter este defeito o facto de este ocorrer em provetes com ou sem junta parece ter pouca relevância dada a dispersão registada. De todos o provete 9 poderá ser aquele em que a curvatura era menos pronunciada ao contrário do 13 em que foi registado o menor valor.

### 7.1.3.3. Cintagem devido à rigidez transversal das chapas

A rugosidade conjugada com a rigidez transversal das chapas introduz cintagem nas extremidades dos provetes. O plano de factura é oblíquo e o material dessa zona é destruído. Este defeito ocorre em todos os ensaios onde o contacto entre as chapas e os provetes não é pontual e é fulcral sempre que não exista outro defeito que acelere o processo de destruição.

Tabela 19 - Parâmetros Estatísticos dos Provetes com rotura provocada pela cintagem

Provetes com junta		
Provete	Tensão de rotura $\sigma_r$	Média (MPa)
4	121	121,71
5	123	
6	135	Desvio Padrão
10	125	8,26
11	105	
15	120	Tensão característica $\sigma_{rk}$ (MPa)
16	121	110,9

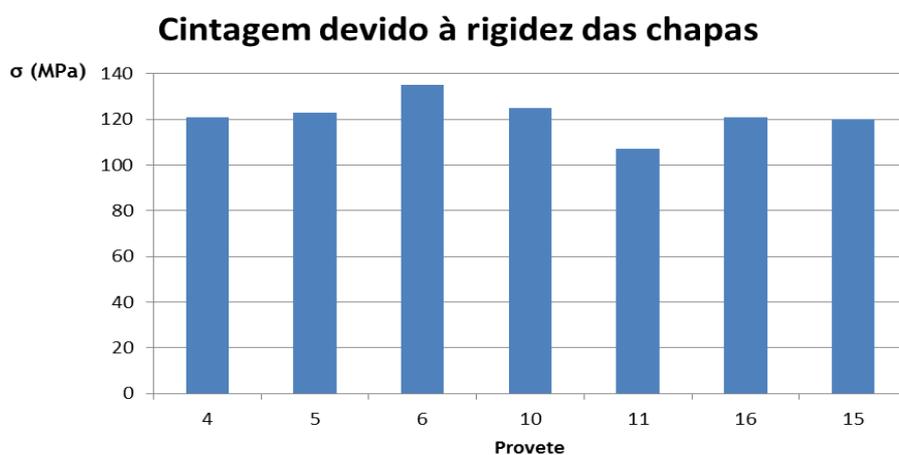


Figura 166 - Distribuição de tensões de rotura para provetes com rotura provocada pela cintagem devida à rigidez transversal das chapas

À excepção dos provetes 6 e 11 todos os provetes atingiram a rotura devido à cintagem a aproximadamente 120 MPa. Este valor é semelhante aos registados para a tensão resistente característica do material pois foi a partir destes provetes que essa tensão foi calculada e como explicado anteriormente este defeito aparece em quase todas as situações. Fica a chamada de atenção que para o cálculo da tensão característica resistente deve realizar o ensaio com um material entre o provete e a chapas de carga que elimine o atrito entre as superfícies e que não acelere o processo de rotura devido ao facto de a sua deformação gerar tracções no provete.

O provete 6 tinha uma pequena curvatura que poderá ter contribuído para minimizar este efeito de cintagem aumentando a sua resistência até aos 135 MPa.

## 7.2. Proposta de método de cálculo da tensão de dimensionamento ( $f_{gd}$ )

Com base nos valores das tensões resistentes características do granito ( $f_{gk}$ ) pretende-se apresentar uma forma simplificada para determinação da tensão de dimensionamento de pilares em granito sobre compressão uniforme ( $f_{gd}$ ), tendo em consideração a presença de defeitos e o comportamento do granito sobre compressão.

Para o granito em estudo temos que a tensão resistente característica do granito é de 120 MPa.

$$f_{gk} = 120 \text{ MPa} \quad (7.1)$$

Considerando o desconhecimento do tipo de defeito por parte do projectista utilizaremos a classificação usadas nos ensaios para as juntas: juntas de boa qualidade, juntas de qualidade intermédia e juntas de má qualidade (Tabela 20).

Tabela 20 - Tensões características em função da qualidade da junta

Qualidade da junta	Provetes	Média da Tensão de rotura (MPa)	Desvio-padrão	Valor característico (MPa)
Boa	7;8	109	9,89	102,7
Intermédia	10;11	115	14,14	105
Má	9;12;13;14	72,5	5,57	66,1

A relação destas tensões com a tensão resistente característica obtida para provetes com junta é denominada de factor de redução de qualidade ( $\alpha$ ) é:

$$\text{junta de boa qualidade} \rightarrow \alpha = \frac{102,7}{120} = 0,86 \quad (7.2)$$

$$\text{junta de qualidade intermédia} \rightarrow \alpha = \frac{105}{120} = 0,88 \quad (7.3)$$

$$\text{junta de má qualidade} \rightarrow \alpha = \frac{66,1}{120} = 0,55 \quad (7.4)$$

Estes valores terão de ser reduzidos tendo em conta o comportamento mecânico do granito. A Figura 19 indica que em ensaios de compressão o granito demonstrou ser instável a partir de 75% da tensão de rotura. A fase C corresponde à fase em que o granito continua a fissurar mesmo que o carregamento seja mantido constante. Para considerar esta situação introduz-se

um factor de redução para cargas de longa duração ( $\beta$ ) de 0,75 tendo em conta os efeitos desfavoráveis da fluência e da progressão de fissuras sob carga constante.

Então tendo em conta estes dois factores surge a seguinte equação,

$$f_{gd} = \alpha \times \beta \times f_{gk} \quad (7.5)$$

Com  $\alpha$  e  $\beta$  de acordo com a Tabela 21.

Tabela 21 - Valores de  $\alpha$  e  $\beta$

Parâmetros	Qualidade da junta		
	Boa qualidade	Qualidade Intermédia	Má qualidade
$\alpha$	0,85		0,55
$\beta$	0,75		

A título de exemplo para uma tensão característica resistente ( $f_{gk}$ ) de 120 MPa obtêm-se os seguintes valores de tensão de dimensionamento ( $f_{gd}$ ):

$$\text{junta de boa qualidade} \rightarrow f_{gd} = 0,85 \times 0,75 \times 120 = 77 \text{ MPa} \quad (7.6)$$

$$\text{junta de qualidade intermédia} \rightarrow f_{gd} = 0,85 \times 0,75 \times 120 = 77 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

$$\text{junta de má qualidade} \rightarrow f_{gd} = 0,55 \times 0,75 \times 120 = 50 \text{ MPa} \quad (7.8)$$

# Capítulo 8

## Conclusões

Este último capítulo finaliza este trabalho e pretende apresentar de forma sucinta as principais conclusões que se retiram dos resultados obtidos na análise experimental e na análise numérica. O trabalho experimental não decorreu como inicialmente previsto devido à qualidade dos provetes fornecidos mas ainda assim foi possível retirar conclusões sobre a importância da presença de defeitos e avaliar a perda de resistência associado a cada um dos defeitos.

Em relação à análise numérica, foi possível identificar o caminho das forças através da matriz e grãos, com recurso a modelos de escoras e tirantes que permitiram uma identificação simples das condições de equilíbrio das forças internas. Com base nesses resultados concluiu-se que:

- A dimensão relativa entre o grão e a matriz tem influência no caminho das forças. Existe uma proporção que conduz a um máximo das forças de tracção que abrem fissuras em primeiro lugar no Feldspato, ou na fronteira entre Quartzo e Feldspato, que podem indicar a localização das fissuras iniciais. Após essa proporção os valores das tracções diminuem (Tabela 10);
- Na situação de grãos alinhados (correspondente a uma certa estratificação do material) as maiores tracções surgem na matriz na direcção transversal à carga e as fissuras resultantes poderão progredir longitudinalmente na matriz;
- Quando os grãos estão desalinhados as tracções surgem sempre no Feldspato independentemente do mineral que constitui a matriz, tal como já observado por outros autores. Após as primeiras fissuras, outras poderão surgir na fronteira entre os minerais e no interior do Quartzo;
- O equilíbrio nas proximidades de uma fissura é estabelecido de forma diferente, dependendo do mineral que constitui a matriz. Sendo a matriz de Quartzo verificou-se que comparativamente aos modelos sem fissura, o equilíbrio exige mais compressão nas proximidades da fissura e as tracções existentes localizam-se no interior do mineral sendo quase nulas. Quando a matriz é de Feldspato o equilíbrio nas proximidades das fissuras inclui esforço de tracção nessa zona. Poderão surgir novas fissuras na fronteira entre minerais que poderão progredir para o interior do Quartzo e a que já existia poderá continuar progredir. O caminho das forças é quase vertical para ambos os casos;

- Em juntas de disco diamantado as tracções são semelhantes às registadas na situação sem junta e as maiores tracções continuam a surgir no interior dos Feldspatos, independentemente do material que constitui a matriz (Figura 79 e 80);
- Em juntas de fio diamantado surgem tracções em ambos os minerais, quase em simultâneo devido à elevada concentração de tensões provocada pela rugosidade.

A análise experimental permitiu visualizar e compreender os mecanismos de rotura associados aos defeitos utilizando os registos das extensões, as filmagens e a reconstituição dos provetes. Referente à análise experimental dos provetes ensaiados conclui-se que:

- A rugosidade perde preponderância na rotura quando as superfícies de contacto possuem imperfeições como superfícies inclinadas e/ou com curvatura;
- As superfícies de contacto inclinadas são causadoras de rotura por compressão numa das faces devido à flexão que daí resulta e provocam perdas de resistência de aproximadamente 20% em relação à capacidade resistente do granito;
- As superfícies com curvatura são muito problemáticas pois a transmissão de força é feita de forma concentrada “pontual” ou em “faca”, provocando uma rotura prematura devido ao surgimento de microfissuras. A resistência do granito foi afectada em cerca de 45%;
- A cintagem reduz também a capacidade resistente, pelo que se aconselha que o contacto entre granito e metal não seja directo. Este contacto deve ser feito com um material antiaderente para evitar a cintagem e de preferência com rigidez suficiente para que a sua deformação não provoque tracção transversal nas superfícies de contacto;
- Em juntas de boa qualidade e intermédia as juntas entre blocos não tiveram qualquer influência na rotura, sendo esta sempre condicionada pela cintagem criada pelas chapas de aço.

# Capítulo 9

## Bibliografia

### 9.1. Publicações científicas

- [1] E. Eberhardt, B. Stimpson e D. Stead, “The influence of mineralogy on the initiation of microfractures in granite,” em *9th International Congress on Rock Mechanics*, Paris, 1999.
- [2] J. Heyman, *The Stone Skeleton. Strutural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [3] C. M. Pinto, *Concepção e análise estrutural de um novo tipo de pilar esbelto em granito*, Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2008.
- [4] G. Vasconcelos, *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behaviour of ancient masonry shear walls*, Guimarães: Universidade do Minho, 2005.
- [5] G. Vasconcelos e P. Lourenço, “Experimental Characterization of the Compressive Behavior of Granites,” *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, pp. 61-71, 2008.
- [6] J. Gramberg, *A non-conventional view on rock mechanics and fracture mechanics*, Rotterdam: A.A. Balkema, 1989.
- [7] M. Rocha, *Mecânica das Rochas*, Lisboa: LNEC, 1981.
- [8] M. Heap e D. Faulkner, “Quantifying the evolution of static elastic properties as crystalline rock approaches failure,” em *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, p. 564-573.
- [9] M. Diederichs, “Rock Fracture and Collapse Under Low Confinement Conditions,” em *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Springer-Verlag, 2003, pp. 339-381.
- [10] V. Cavaleiro, F. Santos Nunes e L. Sousa, “Efeito de Escala em Provetes Prismáticos de granito Submetidos à Compressão Uniaxial,” em *International Conference on Engineering UBI*, Covilhã, 2011.
- [11] D. Li, C. C. Li e X. Li, *Influence of Sample Height-to-Width Ratios on Failure Mode for Rectangular Prism Samples of Hard Rock Loaded In Uniaxial Compression*, Springer, 2010.
- [12] R. Ribeiro, *Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos*, São Carlos-SP: Universidade de São Paulo, 2005.
- [13] L. Nogami, *Fixação de placas de rochas ornamentais: estudo da aderência com massa*

colante, São Carlos-SP: Universidade de São Paulo, 2007.

- [14] B. Gonçalves e L. Sousa, “Controlo de qualidade de superfícies de rocha ornamental,” em *International Conference on Engineering UBI*, Covilhã, 2011.
- [15] J. Marre, *Méthodes d'analyse structurale des granitoides*, Toulouse: BRGM, 1982.
- [16] E. Eberhardt, B. Stimpson e D. Stead, “Effects of Grain Size on the Initiation and Propagation Thresholds of Stress-induced Brittle Fractures,” em *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Springer-Verlag, 1999, pp. 81-99.
- [17] E. Lajtai, “Microscopic Fracture Processes in a Granite,” em *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Springer-Verlag, 1998, pp. 237-250.
- [18] H. Yoder e C. Tilley, “Origin of Basalt Magmas: An Experimental Study of Natural and Synthetic Rock Systems,” *Journal of Petrology*, Vol.3, Part 3, pp. 342-532, 1962.
- [19] W. MacKenzie e C. Guilford, *Atlas de petrografia. Minerales formadores de rocas en lamina delgada*, Barcelona: Masson S.A., 1996.
- [20] B. Marsh, “On the Crystallinity, Probability of Occurrence, and Rheology of Lava and Magma,” em *Contributions to Mineralogy and Petrology*, SpringerLink, 1981, pp. 85-98.
- [21] S. Swanson, “Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures,” em *American Mineralogist*, Volume 2, 1977, pp. 966-978.
- [22] J. Botelho da Costa, *Estudo e Classificação das Rochas por Exame Macroscópico*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.
- [23] J. Dana e C. S. Hurlbut, *Manual de Mineralogia*, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1983.
- [24] G. Zhang, Z. Wei e R. E. Ferrell, “Elastic modulus and hardness of muscovite and rectorite,” em *Applied Clay Science* 43, Elsevier, 2009, pp. 271-281.
- [25] W. Brown, *Feldspars and feldspathoids, structures, properties and occurrences*, North Atlantic Treaty Organization - Scientific Affairs Division, 1984.
- [26] C. WILFRED TAYLOR, *Correlation of the Mohs's scale of hardness with the Vicker's hardness numbers*, York, 1949.
- [27] L. Li, L. G. Tham, Y. Tsui e P. K. K. Lee, “Numerical investigation on failure process of Hong Kong granite,” em *Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century*, Taylor & Francis, 2001, pp. 303-305.
- [28] C. Coimbra Filho, *Relacção entre o processo de corte e a qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais*, São Carlos-SP: Universidade de São Paulo, 2006.
- [29] I. Regadas, *Aspectos Relacionados às Lavras de granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado de Espírito Santo, Brasil*, São Carlos-SP: Universidade de São Paulo, 2006.
- [30] F. Rodrigues, A. Correia e T. Chambino, *Guia Técnico. Sector da pedra natural*, Lisboa: INETI, 2001.

- [31] Y. Ozçelik, S. Kulaksiz e M. Çetin, “Assesment of the wear of diamond beads in the cutting of different rock types by the ridge regression,” *Journal Of Materials Processing Technology*, pp. 392-400, 2002.
- [32] M. Hood e H. Alehossein, “A development in rock cutting technology,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, pp. 297-305, 2000.
- [33] A. Ersoy, S. Buyuksagic e U. Atici, “Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks,” *Wear* 258, p. 1422-1436, 2004.
- [34] M. Cemal Cakir, C. Ensarioglu e I. Demirayak, “Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material,” *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 102-109, 2009.
- [35] E. Gadelmawla, M. Koura, T. Maksoud, I. Elewa e H. Soliman, “Roughness Parameters,” *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 133-145, 2002.
- [36] LUSAS - Powerful FE technology for specialist applications, Modeller User Manual, version 13, Surrey, 2004.
- [37] D. E. Gill, R. Corthésy e M. H. Leite, “Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties,” em *Engineering Geology*, Elsevier, 2005, pp. 29-51.
- [38] B. Duevel e B. Haimson, “Mechanical Characterization of Pink Lac du Bonnet Granite: Evidence of Nonlinearity and Anisotropy,” 1997.

## 9.2. Internet

- [a] “Archhis,” [Online]. Available: <http://www.archhis.com/bldg/?bl=23614>. [Acedido em 4 Outubro 2012].
- [b] “Hagia Sophia Museum,” [Online]. Available: <http://www.ayasofyamuzesi.gov.tr/en/>. [Acedido em 4 Outubro 2012].
- [c] “Texturas das rochas magmáticas (principais tipos de texturas),” [Online]. Available: <http://www.dct.uminho.pt/pnpg/trilhos/pitoe/paragem5/textura.html>. [Acedido em 15 Março 2012].
- [d] “GeoLex - Léxico de termos geológicos,” [Online]. Available: [http://geoportal.lneg.pt/index.php?option=com\\_content&id=53&lg=pt#page=1](http://geoportal.lneg.pt/index.php?option=com_content&id=53&lg=pt#page=1). [Acedido em 7 Março 2012].
- [e] “Cathédrale de Notre Dame de Paris,” [Online]. Available: <http://www.notredamedeparis.fr/spip.php?article382>. [Acedido em 4 Outubro 2012].
- [f] “Jornal de Notícias,” [Online]. Available: [http://www.jn.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Santar%E9m&Concelho=Constancia&Option=Interior&content\\_id=1812145](http://www.jn.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Santar%E9m&Concelho=Constancia&Option=Interior&content_id=1812145). [Acedido em 10 Outubro 2012].

[g] “Douro Valley,” [Online]. Available: <http://dourovalley.eu/poi?id=2612>. [Acedido em 4 Outubro 2012].

