



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Caracterização Geotécnica das Fundações da Torre de Menagem do Castelo de Marialva

**Pedro Jorge Ramos da Fonseca Nunes**

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

Orientador: Prof. Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro

Covilhã, Outubro de 2012



# Agradecimentos

No momento em que o presente trabalho chega à sua etapa final, não poderia deixar de agradecer às pessoas e instituições que, de uma forma direta ou indireta, me auxiliaram ou contribuíram em alguma fase do mesmo.

Ao meu orientador, Professor Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro, agradeço a orientação, o apoio técnico e humano despendidos e os constantes ensinamentos, ao longo deste período.

Ao Professor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida pelo acompanhamento, sugestões e disponibilidade.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior agradeço o material e equipamento facultado.

Ao Daniel Barbosa pela preciosa ajuda que me deu e constante amizade e disponibilidade demonstrada. Ao João Estêvão pela amizade e companheirismo em todos os momentos.

Aos meus pais, irmãos e especialmente à Ana pelo carinho especial, apoio constante e compreensão que me dedicaram durante a realização deste trabalho e durante todo o meu percurso académico.

Um muito obrigado a todos!



## Resumo

O presente trabalho visa contribuir para o conhecimento das características geotécnicas das fundações relativas ao maciço rochoso da torre de menagem do Castelo de Marialva, assim como dos principais fatores que condicionam essas características. Para esta abordagem, foram descritas as características do diaclasamento, bem como o conhecimento das características físicas e mecânicas do material ensaiado, rocha e solo granítico. Analisou-se a influência do comportamento geomecânico do maciço e do material na estabilidade estrutural dos setores das fachadas pertencentes à respetiva muralha.

A fim de quantificar alguns parâmetros geotécnicos e de resistência dos materiais, foram realizados ensaios “*in situ*” e de laboratório.

O estudo desenvolvido permitiu o estabelecimento de relações entre os resultados experimentais obtidos.

## Palavras-chave

Maciço Rochoso, Diaclases, Zonamento geotécnico, Características geotécnicas, Resistência



# Abstract

This paper aims to contribute to the knowledge of the geotechnical characteristics of the rockmass foundation of the donjon tower of Marialva Castle, as well as the main factors that influence these characteristics. For this approach have been described discontinuities characteristics as well as the knowledge of the physical and mechanical characteristics of the material tested, granitic rock and soil. Has been analyzed the influence of the geomechanical behavior of the massive material and the structural stability of the sectors faces of the sectors of the wall.

In order to quantify certain parameters and resistance of geotechnical materials, tests were carried out "in situ" and laboratory.

The study developed allowed the establishment of relations between the experimental results.

# Keywords

Massive Rocky, Diaclases, Zoning geotechnical, geotechnical characteristics, resistance



# Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização da dissertação	3
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Classificação/descrição de maciços rochosos	5
2.1.1. Classificação litológica	5
2.1.2. Classificação geológica/geomecânica	7
2.1.2.1. Grau de alteração dos maciços rochosos	9
2.1.2.2. Volumetria dos blocos	14
2.1.2.3. Tipos de descontinuidades	15
2.1.2.4. Classificação da qualidade do maciço rochoso segundo o índice RQD	16
2.1.2.5. Resistência ao deslizamento	19
2.2. Descrição das descontinuidades	25
2.2.1. Orientação	26
2.2.1.1. Compartimentação dos maciços rochosos	28
2.2.2. Espaçamento entre diaclases	30
2.2.2.1. Técnica “Scanline”	32
2.2.3. Persistência das descontinuidades	34
2.2.4. Caracterização da rugosidade	36
2.2.5. Resistência das paredes	39
2.2.6. Abertura e preenchimento	41
2.2.7. Água nas descontinuidades e percolação	45
2.2.7.1. Modelos de fluxo em maciços rochosos	47
2.3. Instabilidade em taludes	48
2.3.1. Causas de instabilização	48
2.3.2. Tipos de instabilidade em taludes	49
3. Metodologias	53
3.1. Estudo do diaclasamento	53
3.1.1. Determinação do espaçamento	54
3.1.2. Medição da Atitude do diaclasamento	55
3.2. Escala de alteração do maciço	58
3.3. Dureza de <i>Schmidt</i>	60
3.4. <i>Tilt test</i>	64
3.5. Resistência mecânica à compressão uniaxial	67

3.6. Velocidade de propagação de ultra-sons	69
3.7. Porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente	70
3.8. Resistência ao corte	72
3.9. Análise granulométrica e equivalente de areia (EA)	73
4. Estudo de Caso	77
4.1. Introdução	77
4.2. Diagnóstico	77
4.2.1. Levantamento preliminar	77
4.2.1.1. Enquadramento geomorfológico	77
4.2.1.2. Caracterização	79
4.2.1.3. Registo histórico de obras/intervenções	81
4.2.2. Inspeção visual	82
4.2.2.1. Mapeamento de anomalias	82
4.3. Ensaios	87
4.3.1. Ensaios “ <i>In Situ</i> ”	87
4.3.1.1. Resultados do diaclasamento e espaçamento de diaclases	88
4.3.1.2. Análise do diaclasamento e espaçamento de diaclases	94
4.3.1.3. Resultados dos ensaios com esclerómetro de Schmidt	111
4.3.2. Ensaios Laboratoriais	112
4.3.2.1. Resultados do ensaio da resistência mecânica à compressão uniaxial (UCS)	113
4.3.2.2. Análise do ensaio de resistência à compressão uniaxial em laboratório e “ <i>in situ</i> ”	114
4.3.2.3. Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultra-sons	116
4.3.2.4. Análise do ensaio de resistência à compressão uniaxial e ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	117
4.3.2.5. Resultados do ensaio da absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente	117
4.3.2.6. Análise do ensaio de resistência à compressão uniaxial e ensaios de absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente	119
4.3.2.7. Resultados e análise do ensaio <i>Tilt test</i> , coeficiente de rugosidade da rocha e tensão de corte	121
4.3.2.8. Análise de resultados do ensaio de deslizamento ( $\sigma_n$ , $\tau$ )	123
4.3.2.9. Resultados da análise granulométrica	123
4.3.2.10. Resultados do equivalente de areia	124
4.3.3. Zonamento geotécnico	124
5. Conclusão	127
6. Referências Bibliográficas	131





# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Planta de localização da zona em estudo	1
Figura 1.2 - Metodologia utilizada	4
Figura 2.1 - Hidrogeologia de um maciço sedimentar	8
Figura 2.2 - Características principais dos horizontes de um perfil de alteração de rochas ígneas e metamórficas	11
Figura 2.3 - Diferentes graus de alteração em maciços rochosos	14
Figura 2.4 - Procedimento para medição e cálculo de RQD	17
Figura 2.5 - relação entre tensão de corte e normal em superfície deslizante para três tipos de descontinuidades em diferentes condições geológicas	20
Figura 2.6 - Envolve biliar de rotura de pico obtida a partir de ensaios de corte direto	21
Figura 2.7 - Esquema de ensaios de rampa inclinada	22
Figura 2.8 - Perfis tipo para estimar o coeficiente de rugosidade (JRC)	23
Figura 2.9 - Influencia da orientação de descontinuidades no que respeita a obras de engenharia	27
Figura 2.10 - Esquema representativo da orientação de descontinuidades	27
Figura 2.11 - Representação dos dados de orientação segundo dois métodos	28
Figura 2.12 - Influência do desenvolvimento e orientação das descontinuidades numa fundação	29
Figura 2.13 - Medição do espaçamento de uma face exposta de um afloramento	31
Figura 2.14 - exemplos de espaçamentos de diaclases em afloramentos	32
Figura 2.15 - conjunto de dados do espaçamento utilizando a técnica de “scanline”	33
Figura 2.16 - Representação de diagramas sob diferentes modelos de persistência ou continuidade de várias famílias de descontinuidades	35
Figura 2.17 - Ondulação e tipos de rugosidade de uma superfície de descontinuidade	36
Figura 2.18 - Método para determinação da rugosidade de descontinuidades ao longo de uma direção de potencial deslizamento	37
Figura 2.19 - Perfis típicos de rugosidade	38
Figura 2.20 - Representação esquemática de definições sugeridas da abertura de descontinuidades	42
Figura 2.21 - Exemplos de aberturas em descontinuidades	44
Figura 2.22 - Grupos de maciços rochosos	47
Figura 2.23 - Meios contínuos e descontínuos na avaliação dos problemas relacionados com o fluxo de água subterrânea	48

Figura 2.24 - Principais tipos de rotura de taludes e condições estruturais que lhes dão origem	50
Figura 2.25 - Rotura em taludes	51
Figura 3.1 - Divisão da zona de estudo segundo as faces Norte, Sul, Este e Oeste do maciço rochoso	53
Figura 3.2 - Colocação da fita métrica de forma a determinar a fracturação do maciço rochoso	54
Figura 3.3 - Terminologia definindo a orientação do plano duma descontinuidade	56
Figura 3.4 - Método da regra da mão direita para medição e registo da direcção e inclinação	57
Figura 3.5 - Medição da direcção e inclinação	57
Figura 3.6 - Rede de projecção <i>igual área</i> (Schmidt)	58
Figura 3.7 - Colocação do martelo de Schmidt	61
Figura 3.8 - Martelo de Schmidt tipo L-9	62
Figura 3.9 - Batente de aço (bigorna) para teste de calibração	62
Figura 3.10 - Ábaco de correlação entre densidade, resistência à compressão uniaxial e resposta obtida com o martelo de Schmidt Tipo L	64
Figura 3.11 - visualização de zona limpa para ensaio e posicionamento do martelo	65
Figura 3.12 - Ensaio <i>Tilt test</i> para determinação do ângulo de atrito básico das descontinuidades	67
Figura 3.13 - Representação esquemática da mesa construída para o ensaio	67
Figura 3.14 - Bloco amostrado e respetiva máquina de extração de provetes	67
Figura 3.15 - Realização do ensaio <i>tilt test</i> na mesa de ensaio	68
Figura 3.16 - Representação esquemática do ensaio de ultra-sons	69
Figura 3.17 - Medição da velocidade de propagação de ultra-sons com equipamento PUNDIT	70
Figura 3.18 - Equipamento para ensaio de resistência à compressão uniaxial	70
Figura 3.19 - Esquema de obtenção das medidas antes e durante a realização do ensaio	73
Figura 3.20 - Transferência de amostra contida no recipiente para a proveta e visualização da proveta após pancadas sobre a base, respetivamente	74
Figura 3.21 - Agitador mecânico durante o ensaio	74
Figura 3.22 - Visualização e determinação dos níveis da areia e suspensão argilosa	
Figura 4.1 - Vista aérea do Castelo de Marialva, (a) graben da Longroiva	78
Figura 4.2 - Pormenor da carta geológica de Portugal à escala 1:500000	79
Figura 4.3 - Pormenor ampliado da carta geológica de Portugal à escala 1:500000	79
Figura 4.4 - Representação esquemática da zona intramuros	80
Figura 4.5 - Visualização da Torre de Menagem, Muralha envolvente e respetivo Maciço Rochoso	80
Figura 4.6 - Perfil em corte do pano da muralha da torre de menagem	81

Figura 4.7 - Identificação dos setores de observação	82
Figura 4.8 - Perfil Norte da muralha da Torre de Menagem (Autocad <sup>[14]</sup> ) com visualização das patologias mais visíveis a nível estrutural	83
Figura 4.9 - Perfil Este e Sul da muralha da Torre de Menagem (Autocad <sup>[14]</sup> ) com visualização das patologias estruturais mais relevantes	85
Figura 4.10 - Perfil Oeste da muralha da Torre de Menagem (Autocad <sup>[14]</sup> ) com visualização das patologias estruturais mais visíveis	85
Figura 4.11 - Representação do cunhal da muralha	86
Figura 4.12 - Visualização da muralha interrompida	87
Figura 4.13 - Planta de localização dos setores definidos para estudo	88
Figura 4.14 - Identificação do setor do maciço rochoso em análise	88
Figura 4.15 - Carta de densidades de diaclasamento do setor Norte do maciço	89
Figura 4.16 - Identificação do setor do maciço rochoso em análise	89
Figura 4.17 - Carta de densidades de diaclasamento do setor Este do maciço	90
Figura 4.18 - Identificação do setor do maciço rochoso em análise	91
Figura 4.19 - Carta de densidades de diaclasamento do setor Sul do maciço	91
Figura 4.20 - Identificação do setor do maciço rochoso em análise	92
Figura 4.21 - Carta de densidades de diaclasamento do setor Oeste do maciço	92
Figura 4.22 - Representação dos planos com base na rede de projeção <i>igual área</i> ( <i>Schmidt</i> )	94
Figura 4.23 - Representação dos <i>polos</i> das diaclases e curvas de densidades de concentração dos <i>polos</i> segundo a projeção de <i>igual área</i> ( <i>Schmidt</i> ) na face Norte	95
Figura 4.24 - Representação da orientação das diaclases segundo diagrama de roseta	96
Figura 4.25 - Histograma representativo da inclinação das diaclases	96
Figura 4.26 - Representação dos planos com base na rede de projeção <i>igual área</i> ( <i>Schmidt</i> )	97
Figura 4.27 - Representação dos <i>polos</i> das diaclases e curvas de isodensidades de concentração de <i>polos</i> segundo a projeção de <i>igual área</i> ( <i>Schmidt</i> )	97
Figura 4.28 - Diagrama relativo à orientação do diaclasamento segundo método de roseta	98
Figura 4.29 - Histograma representativo da inclinação das diaclases	98
Figura 4.30 - Representação dos planos com base na rede de projeção <i>igual área</i> ( <i>Schmidt</i> )	99
Figura 4.31 - Representação dos <i>polos</i> das diaclases e curvas de isodensidades de concentração polar segundo a projeção de <i>igual área</i> ( <i>Schmidt</i> ) no setor Sul	100
Figura 4.32 - Diagrama relativo à orientação do diaclasamento segundo método de roseta	100
Figura 4.33 - Histograma representativo da inclinação das diaclases	101
Figura 4.34 - Representação dos planos com base na rede de projeção <i>igual área</i>	

(Schmidt)	101
Figura 4.35 - Representação dos <i>polos</i> das diaclases e curvas de densidades de concentração dos <i>polos</i> segundo a projeção de <i>igual área</i> (Schmidt)	101
Figura 4.36 - Diagrama relativo à orientação do diaclasamento segundo método de roseta	102
Figura 4.37 - Histograma representativo da inclinação das diaclases	102
Figura 4.38 - Diagrama de densidade polar total do maciço rochoso	103
Figura 4.39 - Diagrama de roseta mostrando o sentido de direção das principais famílias e representação das bissetrizes	104
Figura 4.40 - Histograma relativo à inclinação do diaclasamento global no maciço	104
Figura 4.41 - Histograma relativo ao espaçamento de diaclases do setor Norte	105
Figura 4.42- Histograma construído para o setor Este	105
Figura 4.43 - Histograma relativo ao setor Sul	106
Figura 4.44 - Histograma referente ao setor Oeste	106
Figura 4.45 - Histograma relativo ao espaçamento medido no maciço rochoso, considerando todas as medidas feitas em todos os setores da área de estudo	107
Figura 4.46 - Histograma relativo à abertura de diaclases no setor Norte	108
Figura 4.47 - Histograma construído para o setor Este do maciço	108
Figura 4.48 - Histograma referente ao setor Sul	109
Figura 4.49 - Histograma relativo à abertura medida no campo para o setor Oeste	109
Figura 4.50 - histograma relativo ao total de abertura medido no campo do diaclasamento do maciço	110
Figura 4.51 - Preenchimento das diaclases no maciço rochoso	110
Figura 4.52 - Utilização do Martelo (esclerómetro de Schmidt) “ <i>in situ</i> ” para determinar o valor da dureza Schmidt (R) no setor Oeste	111
Figura 4.53 - Rotura dos corpos de prova após ensaio de resistência à compressão uniaxial	114
Figura 4.54 - Comparação entre a média de resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial (MPa) e ensaio com recurso ao martelo de Schmidt (MPa)	115
Figura 4.55 - Relação entre os valores obtidos de resistência à compressão uniaxial “ <i>in situ</i> ” e em laboratório	115
Figura 4.56 - Relação entre os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão uniaxial (MPa) e a propagação da velocidade de ultra-sons (m/s)	117
Figura 4.57 - Relação entre os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão uniaxial (MPa) e a absorção de água (%)	119
Figura 4.58 - Relação entre os valores obtidos da resistência à compressão uniaxial (MPa) e porosidade aberta (%)	120
Figura 4.59 - Relação entre os valores da resistência à compressão uniaxial (MPa) e densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	120
Figura 4.60 - Ensaio tilt test realizado em laboratório com equipamento	

construído pelo autor	121
Figura 4.61 - Diagrama de tensões tangenciais - tensões normais, para os provetes ensaiados	123
Figura 4.62 - Análise granulométrica do solo de fundação do setor norte	124
Figura 4.63 - Identificação das diferentes zonas geotécnicas estudadas (setor Norte)	125
Figura 4.64 - Identificação das diferentes zonas geotécnicas estudadas (setor Este e Sul)	125



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Grau de alteração de maciços rochosos	13
Tabela 2.2 - Tipos de descontinuidades	16
Tabela 2.3 - Classificação da qualidade dos maciços com base no RQD	16
Tabela 2.4 - descrição do tamanho dos blocos em função do número de descontinuidades	18
Tabela 2.5 - descrição do espaçamento de diaclases segundo	32
Tabela 2.6 - Descrição da persistência ou continuidade	35
Tabela 2.7 - Escalas de caracterização de rugosidade	38
Tabela 2.8 - Descrição do grau de meteorização	40
Tabela 2.9 - Estimativa aproximada e classificação da resistência à compressão uniaxial de solos e rochas	41
Tabela 2.10 - descrição da abertura	43
Tabela 3.1 - Avaliação qualitativa do processo de alteração da rocha	59
Tabela 3.2 - Designação, origem e dimensão dos provetes ensaiados	65
Tabela 3.3 - Categorias das frações granulométricas	75
Tabela 4.1 - Valores de espaçamento médio por família de diaclases por setor analisado	93
Tabela 4.2 - Características das diaclases global e de cada setor do maciço	93
Tabela 4.3 - Comparação de resultados dos blocos usados no ensaio com a média de ressalto (R) dos setores do maciço	112
Tabela 4.4 - Valores de resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) dos provetes ensaiados	113
Tabela 4.5 - valores obtidos da velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes ensaiados	116
Tabela 4.6 - Valores obtidos dos parâmetros, absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente dos provetes ensaiados	118
Tabela 4.7 - Resultados do ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ), ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ), coeficiente de rugosidade (JCR) e tensão de corte ( $\tau$ ) referentes aos provetes ensaiados	122
Tabela 4.8 - Litologia e parâmetros físico-mecânicos do zonamento geotécnico da fundação	126
Tabela A1 - - Estimativa de valores da resistência à compressão uniaxial, registo dos resultados do Martelo de Schmidt e o grau de alteração no setor Norte do maciço	135
Tabela A2 - Estimativa de valores da resistência à compressão uniaxial, registo dos resultados do Martelo de Schmidt e o grau de alteração no setor Sul do	

maciço	136
Tabela A3 - Estimativa de valores da resistência à compressão uniaxial, registo dos resultados do Martelo de Schmidt e o grau de alteração no setor Este do maciço	137
Tabela A4 - Estimativa de valores da resistência à compressão uniaxial, registo dos resultados do Martelo de Schmidt e o grau de alteração no setor Oeste do maciço	138
Tabela A5 - Parâmetros do diaclasamento na zona Norte	139
Tabela A6 - Parâmetros do diaclasamento na zona Sul	140
Tabela A7 - Parâmetros do diaclasamento na zona Este	141
Tabela A8 - Parâmetros do diaclasamento na zona Oeste	142



# Lista de Acrônimos

<i>ISRM</i>	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
<i>IAEG</i>	Associação Internacional de Geologia de Engenharia
<i>RQD</i>	Índice de qualidade da rocha “ <i>rock quality designation</i> ”
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>N<sub>x</sub></i>	Diâmetro equivalente
<i>J<sub>v</sub></i>	Número de descontinuidades que intercetam por unidade de volume o maciço rochoso
$\lambda$	Frequência de descontinuidades
$\varnothing_b$	Ângulo de atrito básico da superfície
<i>i</i>	Ângulo de inclinação médio da rugosidade
$\tau$	Tensão de corte ao longo da descontinuidade
$\sigma_n$	Tensão normal no plano da descontinuidade
<i>JCS</i>	Resistência à compressão uniaxial da rocha na parede da descontinuidade
<i>JRC</i>	Coefficiente de rugosidade da descontinuidade
$\alpha$	Ângulo do deslizamento do bloco superior, <i>tilt test</i>
$\varnothing_r$	Ângulo de atrito residual
<i>r</i>	Valor de ressalto (obtido com o esclerómetro de Schmidt L) para descontinuidades alteradas, húmidas ou secas
<i>R</i>	Valor de ressalto (obtido com o esclerómetro de Schmidt L) para descontinuidades sãs e secas
<i>JRC<sub>n</sub></i>	Coefficiente de rugosidade da descontinuidade “ <i>in situ</i> ”
<i>JRC<sub>0</sub></i>	Coefficiente de rugosidade da descontinuidade em laboratório
<i>JCS<sub>n</sub></i>	Resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha das paredes da descontinuidade <i>in situ</i>
<i>JCS<sub>0</sub></i>	Resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha das paredes da descontinuidade em laboratório
<i>L<sub>0</sub></i>	Dimensão do corpo de prova considerado em laboratório
<i>L<sub>n</sub></i>	Dimensão da resistência à compressão uniaxial não confinada da rocha das paredes da descontinuidade e corpo de prova considerado “ <i>in situ</i> ”
<i>u</i>	Pressão da água
$\sigma'_n$	Tensão normal efetiva
<i>S</i>	Espaçamento real
<i>d</i>	Distância média medida com a fita métrica
<i>X<sub>i</sub></i>	Espaçamento entre duas descontinuidades
<i>X<sub>i0</sub></i>	Espaçamento real
<i>Rr</i>	Valor de R obtido na rocha

$R_a$	Valor de R obtido no material de calibragem
$\sigma_c$	Tensão compressão da rocha
$c$	Coesão aparente
$\emptyset$	Ângulo de atrito
$A$	Absorção de água
$m_2$	Massa do provete saturado
$m_3$	Massa do provete seco
$m_1$	Massa do provete imerso
$P_a$	Porosidade aberta
$d^t$	Densidade da água à temperatura ambiente
$K$	Constante da proveta, equivalente de areia
$d_1$	Distância do nível superior da suspensão argilosa ao traço de referência superior da proveta, equivalente de areia
$d_2$	distância entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso do pistão, equivalente de areia
$V_p$	Velocidade de propagação de ultra-sons
$UCS$	Resistência à compressão uniaxial