INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO INDIRECTA EM PEDRA NATURAL

André Manuel Mendonça de Sousa Pacheco

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente:	Professor Doutor Luís Manuel Varejão de Oliveira Faria
Orientador:	Professor Doutor Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral
Co-orientador:	Professora Doutora Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante
Vogal:	Professor Doutor Luís Manuel Guerra da Silva Rosa

Junho de 2012

Agradecimentos

Chegando ao fim de uma caminhada muito importante na minha vida, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram, e permitiram a realização deste trabalho, em especial:

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Pedro Amaral e Prof. Doutora Virgínia Infante pelo acompanhamento, disponibilidade, e o forte apoio e motivação ao longo desta dissertação.

À Mestre Vera Pires, agradeço o inigualável apoio, amizade, motivação e atenção dada ao longo deste trabalho.

A área Científica de Projecto Mecânico e Materiais Estruturais pelo uso dos laboratórios e materiais.

À minha família e amigos, pelo apoio em todos os momentos mais e menos bons, em especial à minha Avó pelas suas palavras de apoio e carinho.

Ao meu Irmão e Família, pela compreensão e ajuda em todas as fases da minha vida.

A uma pessoa muito Especial e sua Família, pelo apoio e carinho transmitido.

Por fim aos meus Pais, meus heróis, que sem eles nada disto era possível, pelo sacrifício, e por acreditarem em mim. Um grande e especial Obrigado.

Resumo

A pedra natural tem sido utilizada como material de construção desde os primórdios do Homem face à sua durabilidade, resistência e estética.

As recentes inovações na fixação de pedra em fachadas são mais complexas do que as aplicações estruturais tradicionais, no entanto estas podem ser simples e duradouras se forem estudadas de acordo com as características das pedras.

Este trabalho estabelece uma experiência laboratorial para o estudo da carga e comportamento de rotura do sistema de fixação indirecta furo cilíndrico com inserção de cavilha de aço através de testes realizados em granitos, Amarelo de Vila Real (AVR) e Cinzento de Alpalhão (SPI).

Foram estudadas duas condições diferentes de ligação entre a cavilha de aço e a rocha: utilizando uma camisa polimérica, e uma bucha química de secagem rápida; as diferenças nas forças de rotura na ancoragem e os respectivos ângulos foram analisados.

Verificou-se que, ao aplicar-se a CP ao sistema de fixação, ambos os granitos atingiram valores menores de força de rotura quando comparados com a BQ, mas apresentando valores superiores nos ângulos de rotura.

Efectuou-se a modelação numérica pelo Método de Elementos Finitos (MEF) através do *software* ANSYS® do mesmo sistema, inserindo as diferentes características de todos os elementos utilizados nos ensaios experimentais.

Verificou-se, pela distribuição da deformação nas áreas próximas ao sistema de fixação, que estão de acordo com o modo de contacto ocorrido nos ensaios de arrancamento.

O objectivo deste trabalho insere-se na caracterização dos sistemas de fixação indirecta em pedra natural, numa vertente experimental, e com modelação numérica (MEF) para comparação de resultados.

Pela avaliação dos resultados obtidos pelo MEF nos granitos AVR e SPI com aplicação da CP e BQ, indicam que o modelo proposto pode vir a ser utilizado como ferramenta complementar, em investigação de revestimentos com materiais pétreos.

PALAVRAS CHAVE: Pedra natural, Fachada, Sistema de fixação indirecta, Comportamento de rotura, Método dos Elementos Finitos, ANSYS®

Abstract

Natural stone has been used as a building material since the beginning of mankind due to its durability, strength (resistance) and aesthetics.

Recent fixing methods for stone facades are more complex than the traditional stone structural applications; however, these can be simple and durable if they are studied according to the characteristics of the stones.

This work establishes a laboratory experiment to study the behavior of breaking load for dowel-hole anchoring system with cylindrical stainless steel pin. Tests were conducted on two Portuguese granites, Amarelo de Vila Real (AVR) and Cinzento de Alpalhão (SPI).

Two different dowel fixing conditions were studied: one with polymeric sleeve (PS) and the other with a fast curing mortar (FCM), the differences in the breaking loads and the rupture angles were analyzed.

It was observed, when applying the PS to the breaking load for dowel-hole anchoring system, both the granites reached smaller values for breaking loads when compared with the FCM, but showing higher values for rupture angles.

A computational model by finite-element method (FEM) using ANSYS® software was carried out. The different dowel-fixing conditions of the experimental tests were applied in the FEM model.

It was verified by the distribution of deformation in the areas near the dowel-hole anchoring system that conforms to the contact occurred in dowel-hole tests.

The aim of this work is to evaluate the suitability of FEM method to predict and model the breaking load at dowel-hole tests for the two selected granite types and the two different dowel fixing conditions.

Evaluation between experimental results and (FEM) model for AVR and SPI with PS and FCM fixing conditions indicates that the developed (FEM) model might be used as a complementary tool employed in cladding investigation works with stone materials.

Keywords: Natural stone, Facade, System of indirect fixation, Behavior of breaking load, Finite Element Method, ANSYS®

Índice

Agradecimentos iii

Resumo v

Abstract vii

Índice de figuras xi

Lista de símbolos e abreviaturas xv

1. Introdução 1

1.1. Enquadramento da tese 1

1.2. Estrutura da dissertação 8

2. Materiais utilizados 9

2.1. Tipos de pedras naturais 9

2.2. Elementos metálicos de fixação indirecta 11

2.3. Elementos de ligação/contacto 13

3. Ensaios experimentais: Propriedades físico-mecânico da pedra natural 15

3.1. Estudo da resistência à flexão – carga centrada e momento constante 15

3.1.1. Estudo da resistência à flexão – estimativa da tracção 16

3.2. Absorção de água à pressão atmosférica 16

3.3. Densidade aparente e porosidade aberta 17

3.4. Determinação do módulo de Young 17

3.5. Ensaio de arrancamento no ponto de fixação em provetes de pedra natural 18

3.6. Descrição experimental 18

3.6.1. Determinação da Resistência à Flexão – Carga centrada e Momento constante 18

3.6.2. Determinação da Absorção de Água à Pressão Atmosférica 20

3.6.3. Determinação da Densidade Aparente e Porosidade Aberta 21

3.6.4. Determinação do Módulo de Young 21

3.6.5. Ensaio de Arrancamento 22

4. Modelação computacional 25

4.1. Método dos elementos finitos 25

4.2. Criação de um modelo de elementos finitos 25

4.3. Tipos de análise 26

4.3.1. Análise Estática/Dinâmica 26

4.3.2. Análise Linear/Não linear 27
4.4. Descrição do *software* ANSYS® 27
4.5. Simulação no *software* ANSYS® 28
4.5.1. Geometria do modelo e seu sistema de fixação indirecta 28
4.5.2. Caracterização dos elementos 32
4.5.3. Caracterização dos materiais 34
4.5.4. Definição dos parâmetros para a análise de contacto 34
5. Apresentação e Discussão de Resultados 43
5.1. Pedras naturais 43
5.1.1. Ensaios de Arrancamento 47
5.2. Simulações Numéricas 54
6. Conclusões 65
7. Trabalhos futuros 69
8. Referências Bibliográficas 71
Anexos

Índice de figuras

Figura 1. Exemplos de edifícios com construção em blocos de pedra natural 1

Figura 2. Esquema de uma fachada ventilada [5]. 2

Figura 3. Desvantagens do método de fixação directa. a) Aplicação duma placa de pedra pelo sistema directo [8]; b) Revestimento dum edifício pelo sistema directo; c), d) Destacamento de placas [2], [9]; e) Eflorescência da pedra [10]; f) Descoloração da pedra [1]. 3

Figura 4. Diferentes sistemas de fixação indirecta [2, 7]. 5

Figura 5. Cavilha de aço AISI 316 utilizada nos ensaios 12

Figura 6. Esquema do sistema de fixação indirecta escolhido para o estudo e modo de fixação à parede [1, 30]. 12

Figura 7. Camisa Polimérica utilizada nos ensaios de arrancamento 14

Figura 8. Esquema ilustrativo do ensaio de flexão: a) momento constante; b) carga centrada 15

Figura 9. Ensaio de flexão a momento constante. 19

Figura 10. Ensaio de flexão a carga centrada 20

Figura 11. Determinação do Módulo de Young: a) Provete e apoios; b) Material utilizado. 22

Figura 12. Amostras dos provetes de pedra natural a ensaiar: a) Granito SPI; b) Granito AVR. 23

Figura 13. Geometrias da cavilha de aço e da camisa polimérica utilizado nos ensaios. 23

Figura 14. Modo de encaixe do par cavilha de aço - camisa polimérica. 23

Figura 15. Esquema lateral da montagem do provete de pedra para o ensaio de arrancamento. 24

Figura 16. Montagem do provete no ensaio de arrancamento no laboratório. 24

Figura 17. Volumes gerados referentes aos casos 1 e 3: a) Volume da pedra natural; b) Volume da CP; c) Volume da cavilha de aço; d) Modo de encaixe dos três volumes gerados. 30

Figura 18. Volumes gerados referentes aos casos 2 e 4: a) Volume gerado das áreas correspondentes à BQ e cavilha; b) Volume final para a BQ; c) Modo de encaixe dos três volumes criados e que se comportam como um só após o *merge*. 31

Figura 19. Dimensões dos provetes: a) Pedra natural; b) Cavilha de aço e camisa. 32

Figura 20. Representação do elemento SOLID95. 33

Figura 21. Representação dos elementos: a) CONTA174; b) par CONTA174_TARGE170; c) TARGE170. 33

Figura 22. Normais de contacto do 1º par seleccionado: a) Elemento de contacto; b) Elemento alvo. 35

Figura 23. Conjunto dos elementos do 1º par de contacto. 36

Figura 24. Normais de contacto do 2º par seleccionado: a) Elemento de contacto; b) Elemento alvo. 36

Figura 25. Conjunto dos elementos do 2º par de contacto. 37

Figura 26. Área dos elementos seleccionados no ANSYS®: a) CONTA174; b) TARGE170..... 37

Figura 27. Representação dos constrangimentos, apoios, cargas aplicadas e condições de simetria 39

Figura 28. Malha gerada com utilização da ferramenta *sweep* no modelo todo. 40

Figura 29. Ilustração referente à malha do modelo a simular. 41

Figura 30. Provetes faccionados de cada granito após o ensaio de flexão a momento constante: a) AVR; b) SPI. 45

Figura 31. Gráfico força deslocamento para o granito AVR. 45

Figura 32. Gráfico força deslocamento para o granito SPI. 46

Figura 33. Distribuição dos valores da tensão de rotura por população de cada granito..... 46

Figura 34. Provetes após o fim do ensaio de arrancamento com CP: a) AVR; b) SPI. 48

Figura 35. Provetes após o fim do ensaio de arrancamento com BQ: a) SPI; b) AVR. 49

Figura 36. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI com CP. 50

Figura 37. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI com BQ. 51

Figura 38. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI 2A com CP e BQ. 52

Figura 39. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI 2B com CP e BQ. 52

Figura 40. Conjunto representativo do ensaio de arrancamento em gráfico F-extensão, acompanhado de fotos que ilustram alguns troços de comportamento dos granitos com aplicação da CP e BQ. 53

Figura 41. Deformação ao longo do eixo Y para o AVR: a) CP; b) BQ. 54

Figura 42. Deformação ao longo do eixo Y para o SPI: a) CP; b) BQ. 55

Figura 43. Linhas horizontais escolhidas para análise dos valores da Deformação em Y. 55

Figura 44. Zonas escolhidas para análise do estado. 56

Figura 45. Gráfico AVR CP referente à Linha Horizontal Superior da Fig. 43. 57

Figura 46. Gráfico AVR CP referente à Linha Horizontal Inferior da Fig. 43. 58

Figura 47. Gráfico AVR BQ referente à Linha Horizontal Superior da Fig. 43. 58

Figura 48. Gráfico AVR BQ referente à Linha Horizontal Inferior da Fig. 43. 59

Figura 49. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o AVR CP. 60

Figura 50. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o AVR BQ. 61

Figura 51. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o SPI CP. 62

Figura 52. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o SPI BQ. 63

Índice de tabelas

Tabela 1. Características físico-mecânicas da rocha Amarelo de Vila Real [27, 28]. 10

Tabela 2. Características físico-mecânicas da rocha Cinzento de Alpalhão [27, 28]. 11

Tabela 3. Características técnicas da bucha química Pattex TQ 500 [31]. 13

Tabela 4. Identificação do tipo de pedra natural e o tipo de ligação 29

Tabela 5. Características dos diferentes materiais a inserir no *software* ANSYS® 34

Tabela 6. Propriedades de contacto inseridas no ANSYS® 38

Tabela 7. Resultados das propriedades físico-mecânicas dos provetes de granito seleccionados 43

Tabela 8. Resultados das propriedades físico-mecânicas dos provetes de granito seleccionados 44

Tabela 9. Força de rotura obtida nos ensaios para o uso da camisa polimérica (CP) 47

Tabela 10. Força de rotura obtida nos ensaios para o uso da bucha química (BQ) 48

Tabela 11. Forças de cedência e máximas dos ensaios de arrancamento dos granitos com CP e BQ 50

Tabela 12. Resultados nodais da deformação em Y nas linhas horizontais assinaladas na Fig.43 56

Lista de símbolos e abreviaturas

Lista de Símbolos

L	Distância entre apoios no ensaio de flexão a 3 pontos
L_0	Distância entre apoios exteriores no ensaio de flexão a 4 pontos
L_i	Distância entre apoios interiores no ensaio de flexão a 4 pontos
b	Largura da amostra dos ensaios de flexão
h	Espessura da amostra dos ensaios de flexão
σ_{Rf3p}	Resistência em flexão por carga centrada (3 pontos)
σ_{Rf4p}	Resistência em flexão por momento constante (4 pontos)
σ_{Rktf}	Resistência em flexão à tracção
σ_{Rf4p_1}	Valor da resistência em flexão à tracção em provetes de volume v_1
σ_{Rf4p_2}	Valor da resistência em flexão à tracção em provetes de volume v_2
F	Força de rotura
d_{H2O}	Densidade da água a 20 ºC
M_S	Massa do provete seco
M_{Sat}	Massa do provete saturado
M_i	Massa do provete imerso
F_{ced}	Força de cedência
F_{Rmax}	Força de rotura máxima
R	Rigidez do sistema

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
AISI	American Iron and Steel Institute
EN	European Standard
BS	British Standard
NP	Norma Portuguesa
AVR	Amarelo de Vila Real
SPI	Cinzento de Alpalhão
CP	Camisa polimérica
BQ	Bucha química
FRP	Fiber Reinforced Polymer
MEF	Método dos Elementos Finitos
INETI	Instituto Nacional Engenharia, Tecnologia e Inovação
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
FEM	Finite-Element Method
RFDA	Resonant Frequency and Damping Analyser

1. Introdução

1.1. Enquadramento da tese

A pedra natural tem sido utilizada como material de construção desde os primórdios do Homem face à sua durabilidade, resistência e estética. A maior parte dos edifícios emblemáticos ao longo da história foram construídos em pedra, sendo as suas fachadas compostas por paredes maciças de blocos normalmente retiradas de jazidas próximas dos locais de construção. Alguns exemplos estão presentes na Fig.1.

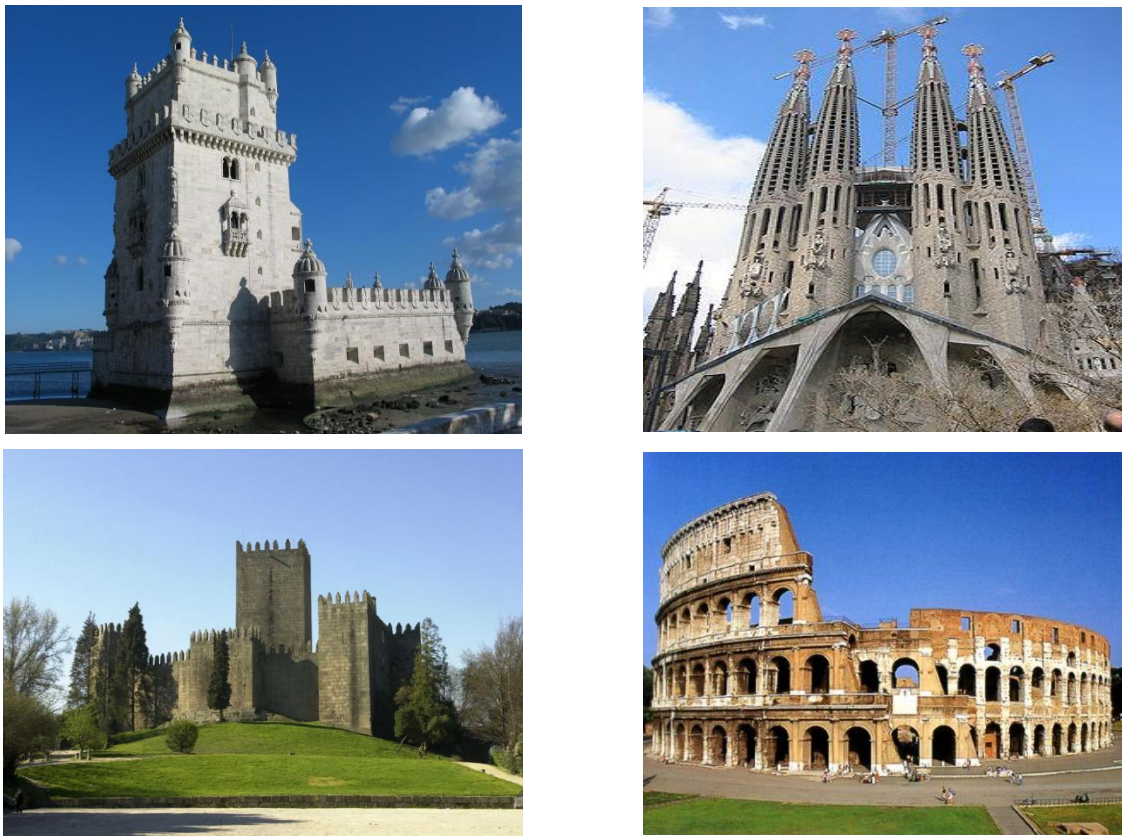


Figura 1. Exemplos de edifícios com construção em blocos de pedra natural

A evolução da utilização de pedra em fachadas ocorre muito paralelamente à evolução da construção de edifícios e tecnologias utilizadas. A revolução industrial juntamente com a introdução de uma nova técnica construtiva de fachadas por Wagner (1888) fez com que a utilização da pedra natural em bloco nas fachadas fosse reduzida para a utilização de placas de pedra de pequena espessura. O uso da pedra acompanha o desenvolvimento das fachadas em si. A aplicação da fachada como uma "pele" do edifício começou no início do século XX, acompanhando o crescimento rápido da construção de edifícios associado ao aumento dramático das alturas dos mesmos.

Ao longo dos últimos 100 anos a necessidade de se economizar, levou a um desenvolvimento não só na construção, com o aparecimento de novas técnicas, bem como nos materiais utilizados para o seu revestimento. A utilização de materiais pétreos nas fachadas era inicialmente estrutural e ornamental (blocos), evoluindo até ao uso de placas de pedra natural sendo comum o uso de mármore, granito e

calcário. Com o aumento do nível de equipamentos de corte alcança-se uma maior quantidade de tipos de revestimentos pétreos a aplicar nas fachadas [1 - 5].

Em 1987 o conceito “Desenvolvimento Sustentável” foi apresentado pela primeira vez no Relatório de Brundtland: “desenvolvimento que dê resposta às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futura darem resposta às delas” [6]. A procura pela eficiência energética tem levado ao desenvolvimento de sistemas de fachadas dinâmicos, um exemplo é a fachada ventilada [4]. A fachada ventilada pode ser definida como um sistema de protecção e de revestimento exterior, caracterizado pelo afastamento entre a parede do edifício e o revestimento (pedra, cerâmica, vidro, entre outros materiais), criando assim uma caixa-de-ar que permite a ventilação da fachada, como mostra a Fig.2. A caixa-de-ar tem normalmente entre 20 a 50 mm.

Para que a fachada funcione, existem orifícios de ventilação, situados nos pontos mais elevados e mais baixo do parâmetro revestido. Possuindo normalmente uma área não inferior a 100 cm^2 por metro de comprimento do revestimento medido na horizontal. Os orifícios vão fazer com que o ar entre por baixo e saia por cima, ventilando a fachada através do chamado "efeito chaminé".

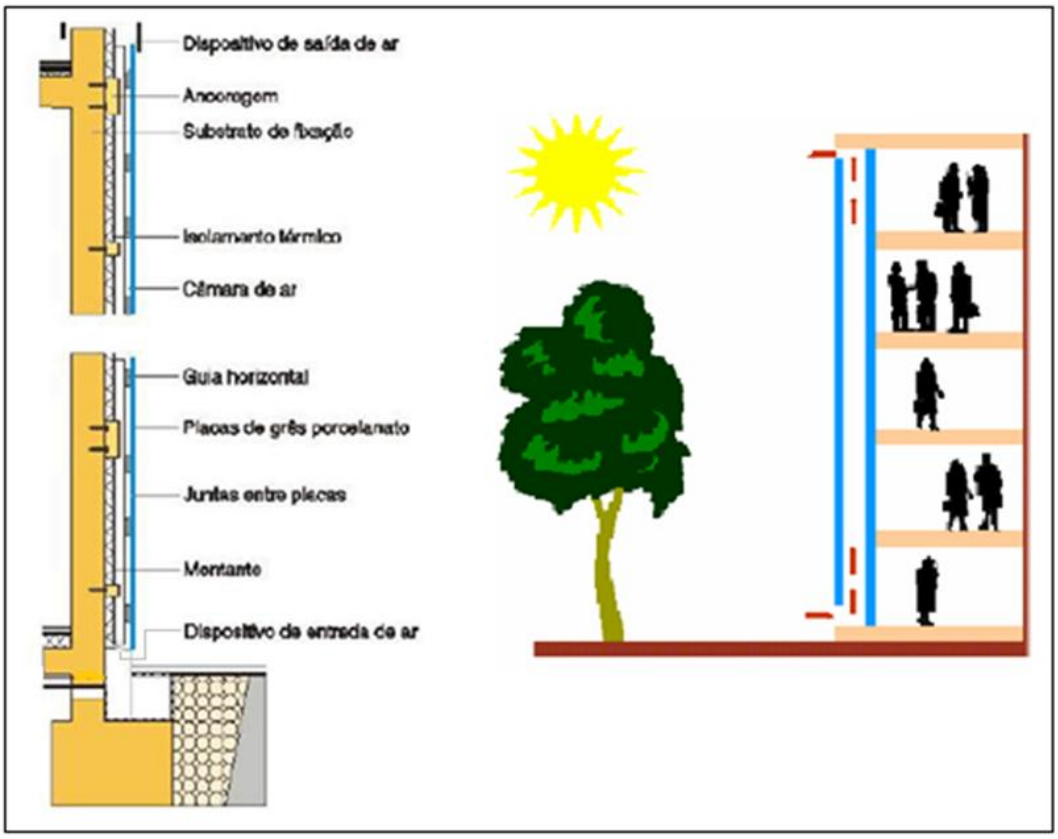


Figura 2. Esquema de uma fachada ventilada [5].

O estudo efectuado neste trabalho tem aplicação directa no tema das fachadas ventiladas.

Actualmente existem métodos de fixação directos e indirectos para aplicação de pedra natural em fachada. Em Portugal os sistemas mais utilizados consistem no sistema directo mais conhecido por

“colagem” das pedras à superfície do edifício, e no sistema indirecto através de dispositivos metálicos [1, 2, 3, 7].

O sistema directo acarreta várias desvantagens, sobretudo devido a incompatibilidade entre o elemento de revestimento e a base de suporte, problemas potenciados pelas variações térmicas e higrométricas resultando no descolamento das placas de revestimento e no aparecimento de manchas (descoloração e eflorescência) nas pedras. Exemplos destas desvantagens estão ilustradas na Fig.3 c) a f). Estas situações levam a que tendencialmente se evolua, sempre que possível, para a utilização de métodos indirectos para fixar os painéis de pedra natural [1, 2, 3, 7].

a) b) c) d) e) f)

Figura 3. Desvantagens do método de fixação directa. a) Aplicação duma placa de pedra pelo sistema directo [8]; b) Revestimento dum edifício pelo sistema directo; c), d) Destacamento de placas [2], [9]; e) Eflorescência da pedra [10]; f) Descoloração da pedra [1].

Os sistemas de fixação indirecta são compostos por ancoragens metálicas devendo ter resistência à corrosão e não deverão estar associados a metais que originam a formação de processos electrolíticos. A escolha do aço inoxidável é o mais comum, sendo constituído por percentagens de ferro, crómio e níquel. Dos diversos tipos de dispositivos e ancoragens, os mais aplicados são:

- Furação com broca cilíndrica – para inserção de cavilha ou, no tardoz da pedra, para inserção de bucha metálica expansiva.

- Furação em entalhe ou ranhura (kerf) – para suporte ao longo de todo o bordo de apoio ou em parte, com cantoneira ou em duplo T.

- Furação em corte de ranhura circular ou prismática – para apoio com discos.

O sistema de fixação indirecta estudado nesta dissertação foi o sistema de furação com broca cilíndrica para inserção de cavilha. Deu-se relevância apenas às reacções da cavilha na pedra natural, mediante duas ligações diferentes entre si (camisa polimérica e bucha química), deixando-se de parte a fixação do sistema à parede.

Um conhecimento completo do material e técnicas de instalação é fundamental para um projecto e correcta instalação de um revestimento de pedra natural para que, ao longo da sua vida útil, não se percam as vantagens de possuir um revestimento deste tipo, como por exemplo uma melhor eficiência térmica (menor diferença de temperatura dentro dos edifícios), uma melhor eficiência acústica e uma menor probabilidade de infiltrações nos edifícios [11, 12, 13].

Vários trabalhos e estudos publicados reforçam a necessidade de conhecimento aprofundado das características petrográficas, mecânicas e físicas das diferentes pedras naturais, bem como dos sistemas de fixação antes de iniciar o projecto de uma fachada.

Uma selecção cuidadosa do bloco de pedra natural de onde se irão cortar as placas, juntamente com o conhecimento detalhado das tipologias do sistema de fixação a aplicar e das características físico-mecânicas dos materiais pétreos, são de extrema importância a fim de prever com maior rigor sobre a durabilidade do revestimento. Não só o aspecto estético, como o estudo composição mineralógica do material pétreo constituinte do revestimento são igualmente fundamentais por estarem relacionados com a capacidade de alteração face ao ambiente agressivo dos grandes centros urbanos [14].

A relação entre a resistência do material e a resistência no local de ancoragem, bem como os estados de tensão induzida pela ancoragem por cavilha, foram estudados, bem como as propriedades do material pétreo. Verificou-se que o projecto de uma fachada baseado unicamente na resistência à flexão de painéis de pedra em detrimento de um projecto que tem em conta a resistência à ancoragem por cavilha é inseguro, ainda que seja prática habitual no dimensionamento [15].

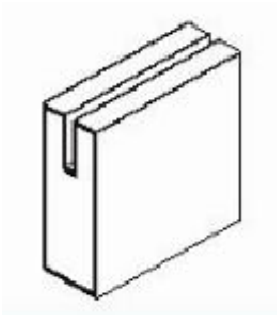
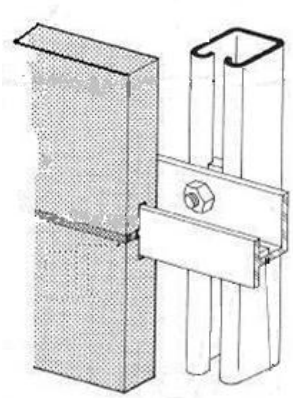
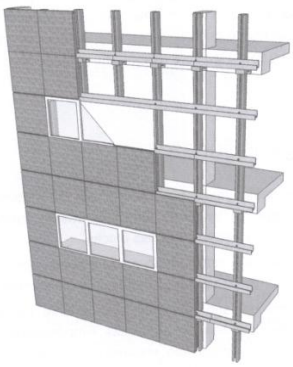
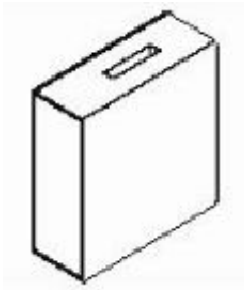
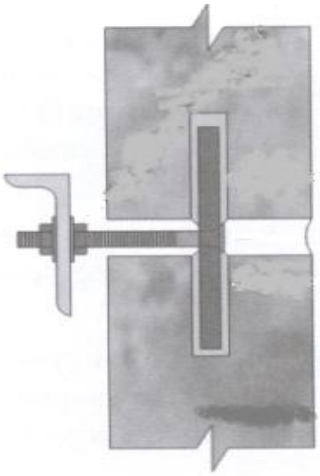
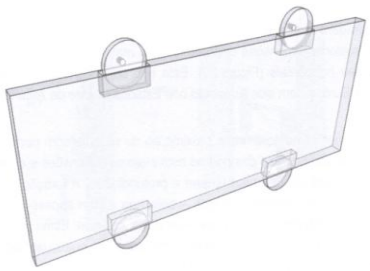
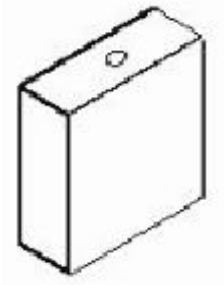
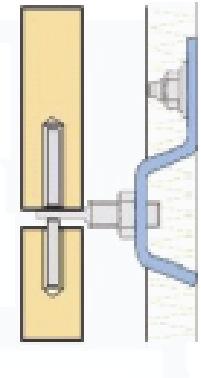
Tipo de Ancoragem	Esquema da montagem na placa de pedra	Exemplo da montagem em fachada
Entalhe (*kerf*) 		
Ranhura (*slot*) 		
Furo (*hole*) 		

Figura 4. Diferentes sistemas de fixação indirecta [2, 7].

Segundo Gerns [3]: “Novos sistemas de revestimento instalados rapidamente ou usando tecnologias não comprovadas fracassaram mais rapidamente do que muitos dos sistemas de instalação anterior.

O conhecimento aprofundado dos materiais, projecto e construtibilidade são importantes para um projecto adequado de sistemas de revestimento de pedra com espessura fina."

O trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende ir ao encontro de algumas lacunas encontradas na caracterização, projecto e dimensionamento dos sistemas de fixação indirecta para pedra natural em fachadas.

Normalmente são realizados ensaios de caracterização para determinação da resistência ao arrancamento (sob orientação da norma ASTM C 1354) das placas de pedra natural a aplicar em fachadas exteriores. Outros ensaios complementares e essenciais são realizados mediante as normas EN 12372:2006 para a flexão a três pontos, EN 13161:2008 na flexão a quatro pontos, EN 13755:2005 para a absorção de água, EN 14146:2003 no cálculo do módulo elástico, e EN 1936:2005 para a densidade e porosidade das pedras, permitindo conhecer de um modo mais aprofundado a pedra que se pretende aplicar. No entanto, a utilização de outras ferramentas complementares como o MEF não está habitualmente contemplada nos projectos de fachadas com pedra natural ao contrário do que já é feito para outros materiais, tais como vidro [16], argamassa e placas cerâmicas [17].

A origem do Método dos Elementos Finitos (MEF) remonta ao final do século XVIII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos [18]. Diversos matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas durante mais de um século, pouco se evolui porque o processamento de equações algébricas era difícil e limitado [19]. Em meados de 1950, com os avanços tecnológicos vividos, mais concretamente na computação, veio permitir a elaboração e resolução de sistemas de equações complexas [19]. Decorridos 6 anos, Turner, Clough, Martins e Topp, que projectavam aeronaves para a Boeing, propuseram um método de análise estrutural similar ao Método dos Elementos Finitos [20]. Em 1960 estes autores utilizaram e descreveram o Método dos Elementos Finitos [20]. Ao longo da década de 60 e com a banalização do recurso ao computador, tornou-se prática corrente a análise de estruturas com diversas geometrias, com múltiplos materiais e sujeitas a diversos carregamentos [21]. Na década de 70, com o rápido desenvolvimento de computadores mais potentes, a aplicação do MEF teve um impressionante crescimento e uma enorme divulgação no meio científico. Actualmente, o método representa uma poderosa ferramenta para análise numérica, utilizada na engenharia, na física e na matemática. Os trabalhos divulgados nessas áreas contribuíram significativamente para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do MEF [22].

Ao nível de estudos, artigos ou teses publicados sobre o uso do Método dos Elementos Finitos para caracterizar e modelar os sistemas de fixação indirecta em pedra natural, verificou-se, tal como já referido que é um tema e uma área pouco explorada.

Estabelecer uma metodologia para a aplicação da modelação computacional ao estudo do comportamento estrutural de uma ponte e de vigas de betão armado, com e sem aplicação das lâminas FRP (fiber reinforced polymer), permitiu concluir que o comportamento geral dos modelos de

elementos finitos apresentados em gráficos força-deformação mostrou ser uma boa aproximação aos testes realizados experimentalmente. No entanto, os modelos de elementos finitos mostraram uma rigidez ligeiramente maior que a dos testes [23].

A avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento directo de fachadas é possível através de um procedimento numérico (MEF) e experimental com aplicação de cargas cíclicas e térmico [24].

Ao nível de análise numérica de contacto entre materiais, verificou-se que a maioria dos estudos efectuados são direccionados ora para componentes de mecânica, ora na medicina nomeadamente nos ramos da ortopedia e odontologia.

Com o objectivo principal de desenvolver uma metodologia simplificada para o cálculo das dimensões das placas de pedra e seus furos de inserção, através da investigação da relação entre a resistência à flexão e a força de rotura de um sistema de fixação indirecta (furo-cavilha), Camposinhos e Camposinhos [25], também investigaram por um modelo em elementos finitos para avaliação do valor da carga aplicada quando a tensão principal máxima atingisse a resistência do material. Concluíram que a utilização do método dos elementos finitos com as propriedades linear elástica dos materiais, em conjunto com o critério de falha por tensões principais máximas quando o módulo de ruptura é alcançado, mostrou ser um procedimento apropriado para a estimativa da força de rotura no orifício de ancoragem [25].

Esta dissertação desenvolve-se ao nível de ensaios mecânicos e de modelação por MEF do ensaio de arrancamento de um sistema de fixação indirecto (Perno-Cavilha) com duas situações distintas de contacto entre a cavilha e a pedra natural.

O objectivo deste trabalho insere-se na caracterização dos sistemas de fixação indirecta em pedra natural, numa vertente experimental, e com modelação em elementos finitos para comparação de resultados. Desta maneira pretende-se conhecer de modo integrado a resistência mecânica e as limitações de cada tipo de pedra e método de fixação, de forma a ajudar os projectistas a eliminarem problemas que possam vir a surgir nas fachadas, e poderem dimensionar com uma perspectiva mais próxima.

1.2. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos:

1. Introdução

   Enquadramento do tema, os motivos que levaram à sua escolha e a importância deste no contexto actual.
2. Materiais

   Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados na elaboração deste trabalho, o tipo e as pedras escolhidas, bem como as suas características gerais. Os elementos de fixação e ligação são identificados e descritos.
3. Ensaios Experimentais

   No capítulo dos ensaios experimentais explica-se o modo como se caracterizam as propriedades físico-mecânicas das pedras naturais, análise da resistência à flexão, absorção de água à pressão atmosférica, módulo de Young, densidade aparente e porosidade aberta. É exposto o ensaio de arrancamento tanto ao nível teórico como laboratorial.
4. Modelação Computacional

   No quarto capítulo expõe-se a modelação numérica do ensaio de arrancamento e o sistema de fixação indirecta escolhido, para efectuar as simulações pretendidas. É feita uma abordagem teórica ao Método dos Elementos Finitos e ao *software* ANSYS®.
5. Discussão de Resultados

   Procede-se, então, à avaliação ponderada dos resultados obtidos nos dois casos de estudo, o experimental e o efectuado pelas simulações no *software* ANSYS®.
6. Conclusões

   No capítulo das conclusões são resumidos e argumentados os resultados obtidos nos capítulos anteriores.
7. Trabalhos futuros

   É o capítulo onde se propõe novos caminhos e opções para trabalhos futuros.

2. Materiais utilizados

Neste capítulo serão descritos os diferentes materiais utilizados para a elaboração dos ensaios experimentais e numéricos, tais como, o tipo de pedra natural utilizado, os elementos de fixação metálicos, os diferentes elementos de ligação entre a pedra natural e o sistema de fixação escolhido.

2.1. Tipos de pedras naturais

As pedras naturais, ao contrário dos materiais fabricados utilizados na construção civil, possuem entre si características físicas muito singulares, pois provêm de formações geológicas díspares. Cada tipo de pedra natural pertence a um dos três processos de formação: as rochas ígneas que resultam directamente da solidificação do magma, as rochas sedimentares formadas a partir do material gerado pela destruição erosiva de rochas preexistentes e as rochas metamórficas que sofrem um conjunto de transformações e reacções quando são sujeitas a condições de pressão e temperaturas diferentes das que presidiram à sua génese [3, 8, 26].

As pedras naturais escolhidas para este trabalho são o Amarelo Vila Real (AVR) e Cinzento de Alpalhão (SPI), granitos pertencentes à família das rochas ígneas.

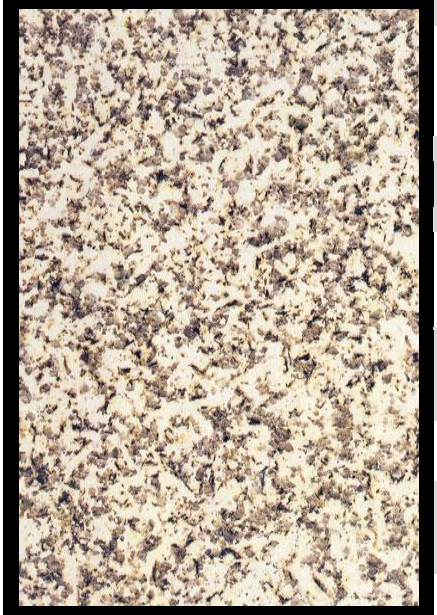
As rochas ígneas podem ser classificadas segundo a profundidade da sua consolidação. Podem ser referidas de plutónicas ou vulcânicas, dependendo da profundidade a que se formam. O granito é uma rocha plutónica devido à sua grande profundidade de consolidação, com uma textura granular ou porfiróide [7, 8, 26].

O granito Amarelo de Vila Real (AVR) oriundo do Distrito de Vila Real possui uma cor amarelo-esbranquiçado a amarelo-acastanhado, de granulado médio ou médio a grosseiro e leve tendência porfiróide, de duas micas, com alteração mais ou menos pronunciada e foliação incipiente. A sua tonalidade tem tendência para variar um pouco da periferia para o interior das massas rochosas, sobretudo na vizinhança das diáclases. No seio da massa granítica podem ocorrer encraves de granito de granulado mais fino, agregados biotíticos e raros filonetes aplíticos e pegmatíticos, em geral oblíquos à fracturação principal, além de filonetes de quartzo centimétricos e decimétricos encaixados segundo o principal sistema de fracturas.

Na Tab.1 estão identificadas as principais características físico-mecânicas do granito Amarelo de Vila Real, de acordo com a base de dados do Instituto Nacional De Engenharia Tecnologia e Inovação (INETI) e do Laboratório Nacional De Energia e Geologia (LNEG) [27, 28].

O granito Cinzento de Alpalhão (SPI) oriundo do Distrito de Portalegre possui uma cor cinzenta homogénea com um granulado fino dominantemente biotítico.

Tabela 1. Características físico-mecânicas da rocha Amarelo de Vila Real [27, 28].



Características Físico-Mecânicas da rocha	
Resistência mecânica à compressão	81,4 – 129,6 MPa
Resistência mecânica à compressão após teste de gelividade	78,5 – 121,8 MPa
Resistência mecânica à flexão	7,8 – 13,8 MPa
Massa volúmica aparente	2580 - 2633 kg/m3
Absorção de água à pressão atmosférica	0,4 - 1,05 %
Porosidade aberta	0,9 - 2,7 %
Coeficiente de dilatação linear térmica valor máximo	7,1 - 8,2 × 10 -6perº C
Resistência ao desgaste	0,1 - 0,7 mm
Resistência ao choque: altura mínima de queda	60 cm

Na Tab.2 estão identificadas as principais características físico-mecânicas do granito Cinzento de Alpalhão, de acordo com a base de dados do Instituto Nacional De Engenharia Tecnologia e Inovação (INETI) e do Laboratório Nacional De Energia e Geologia (LNEG) [27, 28].

As características disponíveis em base de dados constituem uma boa aproximação para uma avaliação inicial das características físico-mecânicas de um material pétreo. No entanto, sempre que se quer aplicar pedra natural numa fachada e, uma vez seleccionado o material, esse lote deve ser devidamente caracterizado.

Tabela 2. Características físico-mecânicas da rocha Cinzento de Alpalhão [27, 28].

Características Físico-Mecânicas da rocha	
Resistência mecânica à compressão	248,1 – 248,5 MPa
Resistência mecânica à compressão após teste de gelividade	236,1 – 236,3 MPa
Resistência mecânica à flexão	16,4 – 21,5 MPa
Massa volúmica aparente	2660 - 2661 kg/m3
Absorção de água à pressão atmosférica	0,29 – 0,3 %
Porosidade aberta	0,78 – 0,8 %
Coeficiente de dilatação linear térmica valor máximo	8,8 × 10 -6 per^{o} C
Resistência ao desgaste	0,4 mm
Resistência ao choque: altura mínima de queda	65 – 70 cm

2.2. Elementos metálicos de fixação indirecta

A aplicação de placas de pedra natural, em fachadas de edifícios é uma solução usada em todo o mundo por ter um alto valor estético, uma capacidade de isolamento térmico único, um custo de manutenção reduzida e uma durabilidade associada a cada tipo de pedra. Dois tipos de fixação dos elementos pétreos são mais comuns de aplicação: a fixação directa, que consiste na colagem da placa por via de diversos produtos adesivos como «cimento-cola», resinas epóxidas, etc; e a fixação indirecta, constituída por dispositivos metálicos para inserção em ranhuras ou furações efectuadas nas placas de pedra, introduzindo ao edifício uma caixa-de-ar entre ambos [2, 7, 8].

Os elementos de fixação indirecta são compostos por variados métodos: agrafos e pontos de argamassa, gatos metálicos, e estrutura intermédia de suporte. Os materiais do sistema de fixação podem ser de latão, cobre ou aço inoxidável. O aço inoxidável, que é o mais comum, pode ser do tipo A2 ou A4 [8].

O aço A2 tem como composição 18% de crómio e 8% de níquel, sendo o mais utilizado em fixadores por possuir boa resistência à corrosão em condições atmosféricas normais em ambientes húmidos [29].

O aço A4 tem como composição 18% de crómio, 10% de níquel e 2% de molibdénio e é normalmente utilizado em zonas caracterizadas por elevada poluição do ar (zonas industriais e costeiras) por ter elevada resistência à corrosão devido à presença do molibdénio [7, 29]

Neste trabalho foi utilizado o aço AISI 316 pertencente ao tipo A4 para as cavilhas (Fig.5) e o modo de fixação da cavilha de aço à parede (Fig.6).

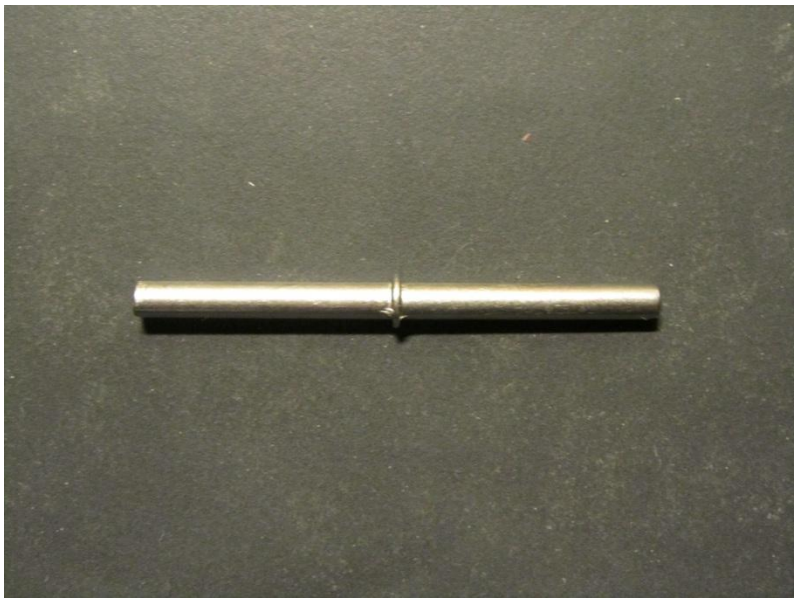


Figura 5. Cavilha de aço AISI 316 utilizada nos ensaios

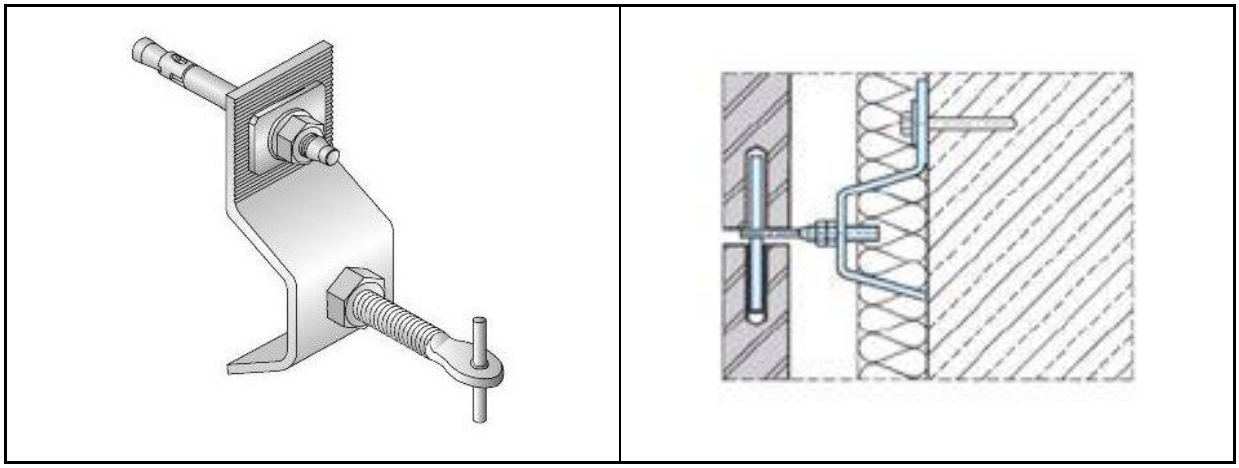


Figura 6. Esquema do sistema de fixação indirecta escolhido para o estudo e modo de fixação à parede [1, 30].

2.3. Elementos de ligação/contacto

A ancoragem por cavilhas, caso estudado neste trabalho, possui procedimentos de execução para que a ancoragem seja um sucesso. Neste trabalho, apenas será dada relevância às características da cavilha e aos elementos/modo de ligação com a pedra.

Num sistema de fixação com cavilhas de aço, as placas de pedra são furadas com um diâmetro superior aos das cavilhas de aço em cerca de 5 mm. Esta folga é essencial para se poder colocar camisas, buchas de polietileno ou outro material resiliente, com o intuito de acomodar os movimentos diferenciais entre as placas e os dispositivos de ancoragem [7].

Em termos das camisas, utilizaram-se camisas de polímero polietileno de baixa densidade (Fig.7) e, para o outro caso de estudo, utilizou-se uma bucha química Pattex TQ 500 que faz uma fixação química de dois componentes de alta resistência.

Na Tab.3 estão identificadas as principais características técnicas da bucha química seleccionada, de acordo com o catálogo da Henkel Portugal [31].

Tabela 3. Características técnicas da bucha química Pattex TQ 500 [31].

Características Técnicas		
	Base:	Resina de poliéster em éster de metacrilato.
	Cor:	Cinza
	Densidade:	Aproximadamente 1520 kg/m^3
	Resistência à Flexão:	56 MPa
	Resistência à Compressão:	108 MPa
	Resistência Térmica:	Até 80 °C
	Temperatura Óptima de Aplicação	20 °C

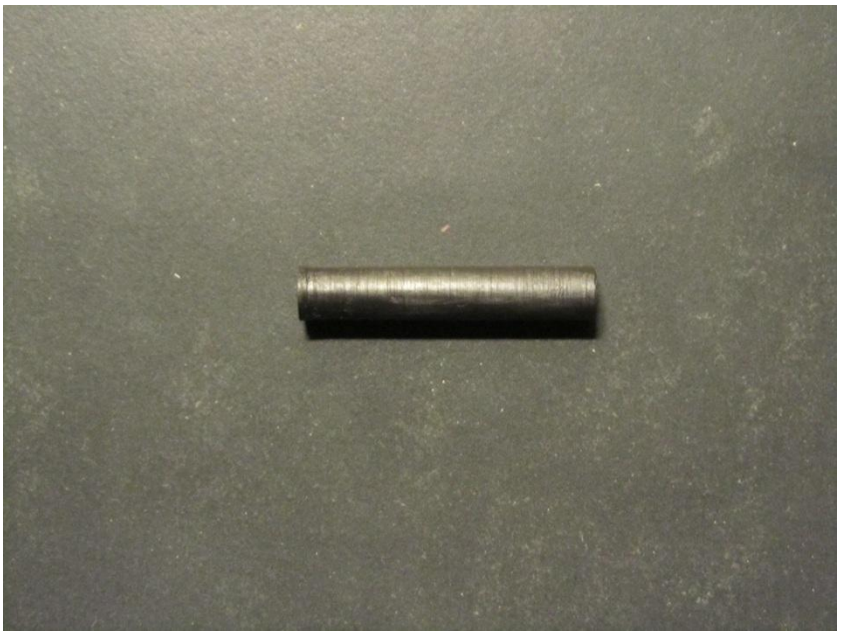


Figura 7. Camisa Polimérica utilizada nos ensaios de arrancamento

3. Ensaios experimentais: Propriedades físico-mecânico da pedra natural

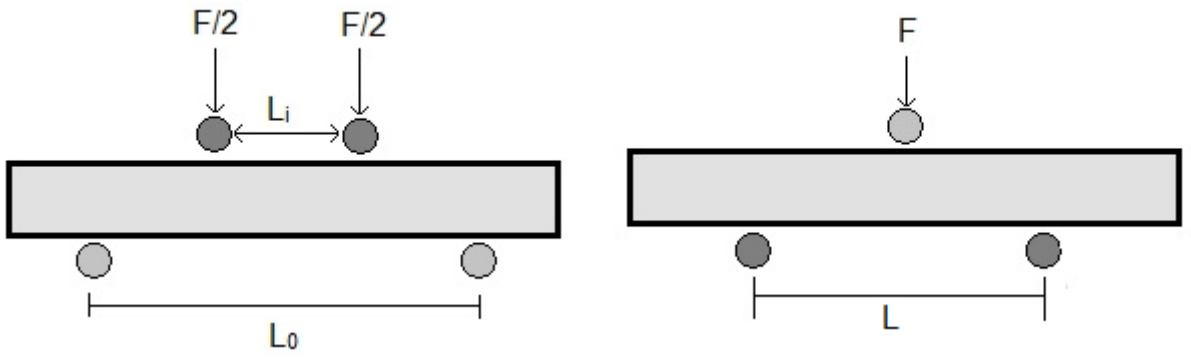
Neste capítulo descrevem-se os ensaios experimentais realizados para esta dissertação.

3.1. Estudo da resistência à flexão – carga centrada e momento constante

A análise da resistência à flexão é efectuada por dois métodos distintos:

- Aplicação de uma carga centrada (EN 12372:2006)
- Aplicação de um momento constante (EN 13161:2008)

Para os ensaios, ambas as normas aconselham um número mínimo de 10 provetes de uma amostragem o mais homogénea possível e acabamento simplesmente serrado, amaciado ou polido. Ambos os métodos também são aplicados a provetes com diferentes acabamentos superficiais dos que os referidos anteriormente (flamejado, bujardado). As superfícies com acabamento devem ficar em contacto com os cutelos de apoio (voltadas para baixo) [32]. Na Fig.8 está representado o esquema relativo aos ensaios de flexão: a) ao de momento constante, b) ao de carga centrada.



a) b)

Figura 8. Esquema ilustrativo do ensaio de flexão: a) momento constante; b) carga centrada

Se o provete de pedra apresentar planos de anisotropia e for conhecido o plano de utilização, a carga aplicada deverá ser no plano da face que será carregada em obra [33]. A resistência à flexão resulta do cálculo das seguintes expressões:

$$\sigma_{Rf3p} = \frac{3\mathrm{FL}}{\mathrm{bh}^2} \quad (1)$$

Da equação (1) calcula-se a resistência à flexão por carga centrada a 3 pontos σ_{Rf3p} (MPa), *F* (N) força de rotura, *L* (mm) é a distância entre apoios, *b* (mm) a largura da amostra, e *h* (mm) a sua espessura [32].

Pela equação (2) calcula-se a resistência à flexão por momento constante (4 pontos) σ_{Rf4p} (MPa), *F* (N) força de rotura, L_0 (mm) distância entre os apoios exteriores, L_i (mm) distância entre os apoios interiores, *b* (mm) a largura da amostra, e *h* (mm) a sua espessura [32].

$$\sigma_{Rf4p} = \frac{3\mathrm{F}(\mathrm{L}_0 - \mathrm{L}_\mathrm{i})}{2\mathrm{bh}^2} \tag{2}$$

3.1.1. Estudo da resistência à flexão – estimativa da tracção

O cálculo da resistência à tracção das pedras naturais foi realizado a partir dos valores obtidos por ensaios de resistência à flexão colhidos em provetes com diferentes volumes [7]. O seu valor esperado é calculado pelo uso da seguinte equação:

$$\sigma_{Rktf} = \frac{1}{2}\left(\sigma_{Rf4p_1} + \sigma_{Rf4p_2}\right) \cdot [2m+2]^{\left(-\frac{1}{m}\right)} \tag{3}$$

A equação (3) é referente ao caso de ensaios em flexão a 4 pontos, tendo em consideração que:

- ⇒ σ_{Rf4p_1} valor característico da resistência à tracção em flexão de um conjunto de provetes de volume v_1
- ⇒ σ_{Rf4p_2} valor característico da resistência à tracção em flexão de um conjunto de provetes de volume v_2
- ⇒ $m = \frac{\ln\frac{v_2}{v_1}}{\ln\frac{\sigma_{Rf4p_1}}{\sigma_{Rf4p_2}}}$

3.2. Absorção de água à pressão atmosférica

A absorção de água à pressão atmosférica e absorção por capilaridade devem ser determinadas para uma correcta selecção de materiais [34]. No caso da absorção por capilaridade deverá ser aplicada apenas para as pedras com porosidade aberta superior a 1% [7].

O estudo da absorção de água à pressão atmosférica nos produtos de pedra natural é importante visto que a água é um dos factores mais influentes na deterioração da mesma quando aplicada no revestimento de fachadas nos edifícios [34]. A análise da absorção de água à pressão atmosférica é

realizada segundo o procedimento descrito na norma NP EN 13755:2005 sendo a percentagem de água determinada pela equação (5) [38]:

$$\frac{(M_{Sat} - M_S)}{M_S} \times 100\% \quad (4)$$

M_{Sat} – Massa do provete saturado
M_S – Massa do provete seco

3.3. Densidade aparente e porosidade aberta

A massa volúmica (densidade) aparente de uma dada pedra natural resulta da relação entre a massa e o volume do provete seco. O volume é determinado pelo espaço aparente calculado, medido externamente, incluindo assim, os vazios ocupados. A porosidade aberta, é o quociente, percentual, entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete. O cálculo da densidade e porosidade aparentes foram efectuados segundo o procedimento descrito na norma EN 1936:1999, não cumprindo apenas a condição de vácuo para a determinação da densidade e porosidade aparentes, visto que não possuíamos recipientes apropriados para obter o vácuo [7, 34].

A densidade aparente (kg/m^3) pode ser calculada pela equação (5); e a porosidade aberta pela equação (6) [34, 39]:

$$\frac{M_S}{(M_{Sat} - M_i)} \times d_{H_2O} \quad (5)$$

$$\frac{(M_{Sat} - M_S)}{(M_{Sat} - M_i)} \times 100(\%) \quad (6)$$

d_{H2O} – densidade da água a 20ºC (igual a 998 kg/m^3);
M_S – massa do provete seco (kg);
M_{Sat} – massa do provete saturado (kg);
M_i – massa do provete imerso (kg).

3.4. Determinação do módulo de Young

Como o material irá ser submetido a ensaios onde irá ser aplicado forças, estas irão provocar deformações no material. Com o objectivo de se entender os limites elásticos (rigidez) do material escolhido foi-se determinar o módulo elástico de cada material.

Seguindo as directivas da norma EN 14146:2004 [40], mediu-se a frequência de ressonância fundamental, por aplicação de uma excitação instantânea no modo flexural para cálculo da constante elástica.

O equipamento *RFDA* (Resonant Frequency and Damping Analyser) permite o cálculo imediato da constante elástica através da análise directa do sinal de um microfone transdutor (o espectro acústico é obtido através de uma transformada de Fourier) e respectiva transformação numa variável elástica [36].

3.5. Ensaio de arrancamento no ponto de fixação em provetes de pedra natural

Este método de teste consiste em determinar a resistência ao arrancamento do sistema de fixação perno – cavilha usado numa fachada de pedra natural. A importância deste estudo consiste em fornecer as seguintes informações:

- Suportar o peso das placas de revestimento e, eventualmente do isolamento térmico;
- Resistir a solicitações horizontais (por exemplo, vento) e impedir o arrancamento das placas em consequência dessas acções;
- Resistir a choques e solicitações acidentais;
- Absorver deformações diferenciais, sobretudo de origem termo-higrométrica, entre o revestimento e o suporte, reduzindo as tensões no revestimento.

O ensaio indica-nos a carga de rotura e o modo de fractura que o provete de pedra natural sofre, seguindo os procedimentos da norma ASTM C 1354:2004, de modo a podermos projectar a fachada de pedra natural em segurança [41].

3.6. Descrição experimental

3.6.1. Determinação da Resistência à Flexão – Carga centrada e Momento constante

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão foram obtidos segundo o procedimento enunciado na norma EN 12372:2006, para carga centrada, e pela norma EN 13161:2008 para momento constante.

Material utilizado para Carga centrada

- Máquina de ensaios mecânicos “Instron – 4302”, com um dispositivo de flexão e uma célula de carga de 10kN;
- 4 Provetes de cada tipo de pedra com dimensões: 150×25×50 (mm);
- Velocidade de ensaio de 0.5 mm/min;
- Espaçamento entre apoios inferiores de 120 mm.

No fim do ensaio, é avaliada a carga de rotura do provete, em valores de tensão (MPa)

Material utilizado para Momento constante

- Máquina de ensaios electromecânica “Instron – 4302”, com um dispositivo de flexão e uma célula de carga de 10kN;
- 25 Provetes de cada tipo de pedra, com dimensões: 210×30×30 (mm);
- Velocidade de ensaio de 0.5 mm/min;
- Espaçamento entre os apoios inferiores de 180 mm;
- Espaçamento entre apoios superiores de 60 mm.

Os resultados referentes ao ensaio de flexão a momento constante foram aproveitados para efectuar uma análise de Weibull, para uma melhor percepção da distribuição da força de rotura dos granitos escolhidos. A Fig.9 representa o ensaio de flexão a momento constante efectuado, e a Fig.10 o ensaio a carga centrada.

Figura 9. Ensaio de flexão a momento constante.

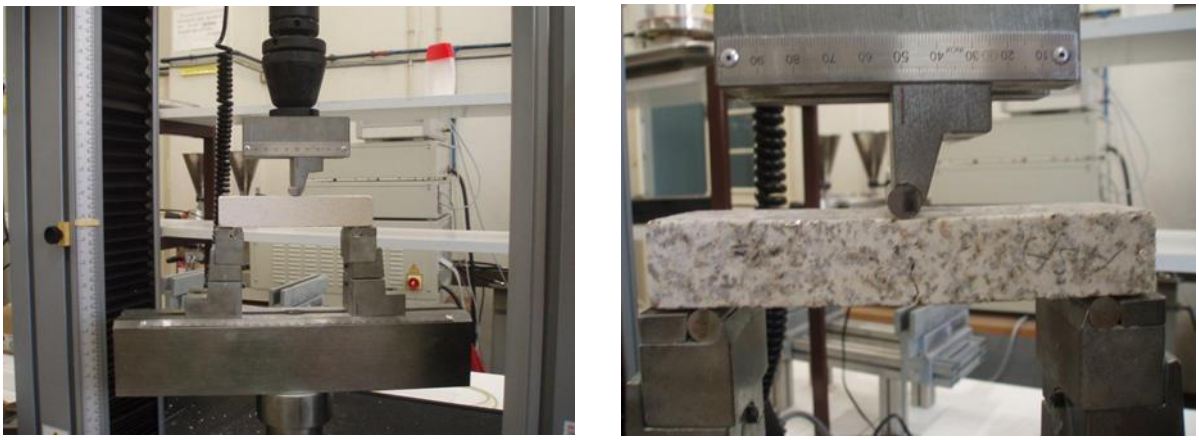


Figura 10. Ensaio de flexão a carga centrada

3.6.2.Determinação da Absorção de Água à Pressão Atmosférica

A absorção de água à pressão atmosférica (%) foi determinada pelo método explícito na norma EN 113755:2005.

Material utilizado

- Recipiente de base plana contendo suportes não oxidáveis e não absorventes para colocação dos provetes;
- Estufa ventilada a 70 ± 5 ºC;
- Balança com uma exactidão de 0,01 g;
- 4 Provetes com dimensões de 150×30×20 (mm).

Os provetes após secagem na estufa foram pesados e medidos, de seguida foram inseridos num tanque com água até ficarem totalmente submersos. Após 72 horas de imersão, (tempo de imersão para a maioria das pedras portuguesas) os provetes são retirados da água, enxaguados levemente das gotas remanescentes e pesados.

3.6.3.Determinação da Densidade Aparente e Porosidade Aberta

Para a determinação da densidade aparente e porosidade aberta, foram seguidos os métodos enunciados pela norma EN 1936:2005.

Material utilizado

- Recipiente de base plana contendo suportes não oxidáveis e não absorventes para colocação dos provetes;
- Estufa ventilada a 70 ± 5 ºC;
- Balança com uma exactidão de 0,01 g;
- 4 Provetes com dimensões de 150×30×20 (mm);

Para calcular a densidade aparente e a porosidade aberta (%), pesaram-se e mediram-se 4 provetes secos em estufa a 70ºC. Cada provete é pesado quando está imerso em água, anotando-se a sua massa imersa (m_i). Após a sua pesagem, retira-se o provete da água limpando-o com um pano húmido e volta-se a pesar o provete para anotar a sua massa saturada (m_{Sat}).

3.6.4.Determinação do Módulo de Young

O cálculo do módulo de Young dinâmico por ressonância em flexão foi de acordo com os procedimentos enunciados na norma EN 14146:2004.

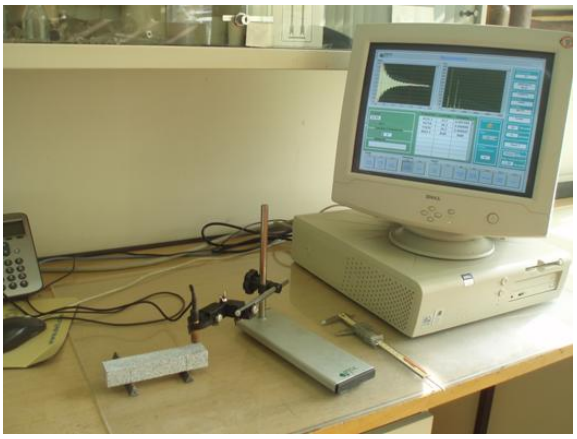
Material utilizado

- Equipamento *RFDA*, *System 23 IMCE*;
- Dados inseridos no equipamento RFDA para cada pedra:
    - Dimensões dos provetes; comprimento, altura, e largura
    - Massa volúmica dos provetes
    - Coeficiente de Poisson de cada pedra
- Dados inseridos no *software*:
    - Ganho de aquisição: 2
    - Frequência de amostra: 100000 (Hz)
    - Tempo máximo de mediação: 3 (s)
    - Tempo de intervalo: 30 (s)
- 7 Provetes de cada tipo de pedra, com dimensões: 150×30×25 (mm);
- Impulsor próprio para o teste (prisma de polímero com uma bola de aço na ponta);
- Microfone;
- Apoios para os provetes;

Após a introdução dos dados no equipamento (via computador), é-nos transmitido a distância entre apoios para cada provete, coloca-se depois os apoios (Fig.11 a)) e inicia-se o teste de acordo com a

norma com o microfone colocado próximo de uma das extremidades do provete para recepção do estímulo instantâneo do provete (Fig.11 b)). O respectivo módulo elástico dinâmico por ressonância em flexão é-nos calculado e fornecido pelo computador.

a)



b)

Figura 11. Determinação do Módulo de Young: a) Provete e apoios; b) Material utilizado.

3.6.5.Ensaio de Arrancamento

Para a determinação do valor da resistência ao arrancamento num sistema de fixação perno – cavilha, seguiram-se os procedimentos enunciados na norma ASTM C 1354:2004.

Material utilizado

- Estrutura de suporte dos provetes de pedra natural;
- Máquina de ensaios electromecânica “Instron – 3369 ”, com um dispositivo de flexão e uma célula de carga de 50kN;
- 3 Provetes de cada tipo de pedra e sistema de fixação, com dimensões: 400×200×30 (mm);
- Cavilhas de aço AISI 316;
- Camisas de polímero (polietileno de baixa densidade);
- Bucha química Pattex TQ 500;
- Velocidade de ensaio de 1 mm/min.

Após receber os provetes de pedra natural, ambos granitos, um Amarelo de Vila Real (AVR) o outro Cinzento de Alpalhão (SPI) iniciou-se a preparação dos mesmos para efectuar-se os ensaios.

Os provetes foram cortados segundo as medidas pedidas: 400×200×30 (mm) para o ladrilho, com furos de 10 (mm) de diâmetro e profundidade de 30 (mm), como mostra a Fig.12.

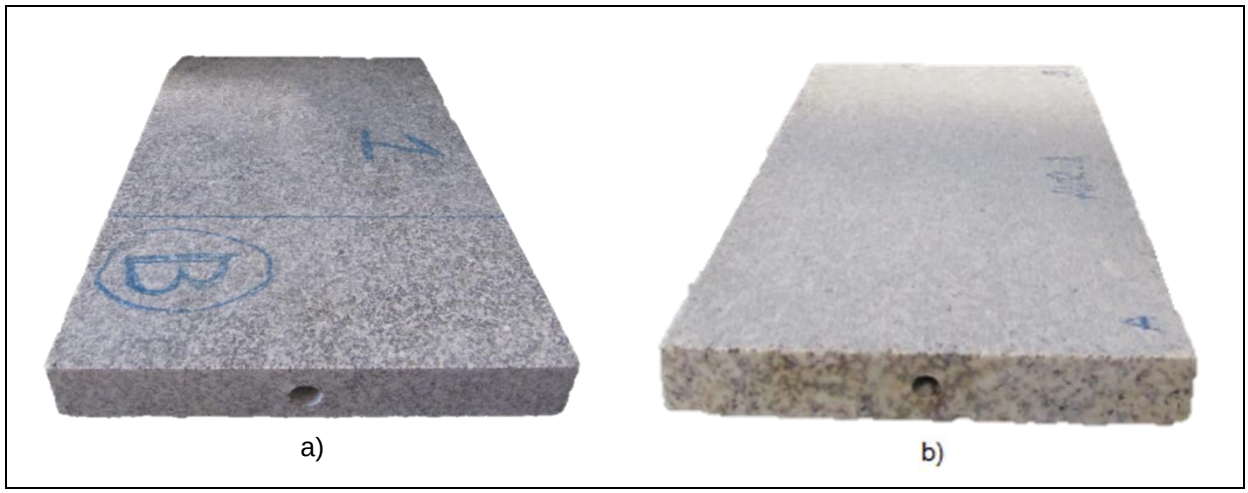


Figura 12. Amostras dos provetes de pedra natural a ensaiar: a) Granito SPI; b) Granito AVR.

Mediu-se os valores reais de espessura, profundidade e diâmetros dos furos dos provetes para verificar-se as dimensões reais. Aplicou-se os pares de sistemas de fixação: cavilha – camisa polimérica, e cavilha – bucha química aos provetes de granito, de modo a que estivesse tudo pronto para iniciar o ensaio. Na Fig.13 apresenta-se as geometrias da cavilha de aço e camisa polimérica, o modo de encaixe entre o par cavilha de aço – camisa polimérica está presente na Fig.14.

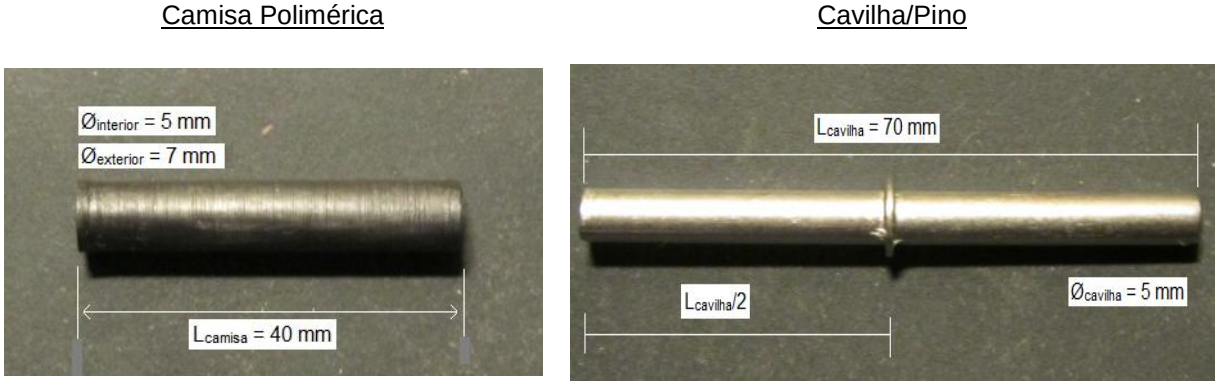


Figura 13. Geometrias da cavilha de aço e da camisa polimérica utilizado nos ensaios.

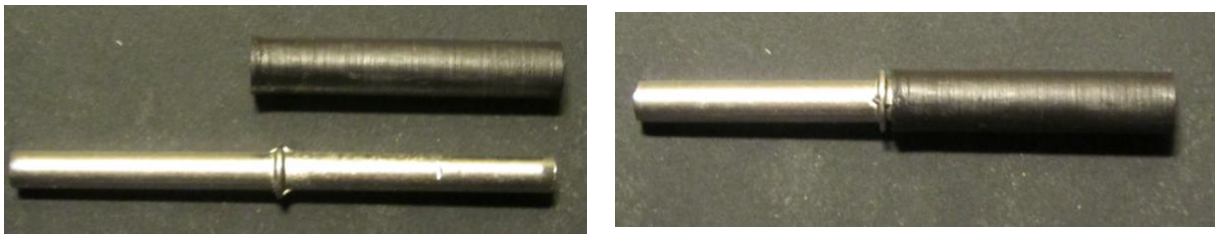


Figura 14. Modo de encaixe do par cavilha de aço - camisa polimérica.

De seguida montou-se o suporte dos provetes na máquina de ensaios seguindo o esquema da Fig.15, calculou-se as distâncias entre o sistema de ancoragem e o apoio simples do provete, inseriu-se o *setup* no programa da máquina de ensaios e iniciou-se o ensaio. A Fig.16 ilustra montagem no laboratório para o ensaio.

Repetiu-se o mesmo procedimento para os restantes provetes e pares de sistemas de fixação, e retirou-se a carga de rotura proveniente do programa.

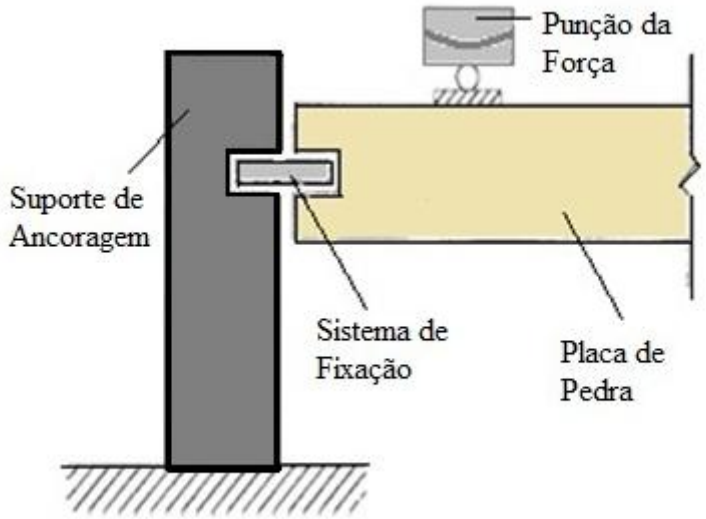


Figura 15. Esquema lateral da montagem do provete de pedra para o ensaio de arrancamento.

Figura 16. Montagem do provete no ensaio de arrancamento no laboratório.

4. Modelação computacional

Neste capítulo descreve-se o *software* (ANSYS®) utilizado na realização deste trabalho, bem como uma introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF), visto que é a base numérica do desenvolvimento do estudo efectuado.

4.1. Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem, no âmbito das estruturas, um papel importante visto ser uma ferramenta muito versátil. Este método tem por objectivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a acções exteriores. Estas acções são representadas por todas as cargas a que a estrutura está sujeita [21, 42, 43].

O aparecimento do MEF veio simplificar a análise estrutural pois, antes do seu aparecimento, a análise dos meios contínuos era efectuada por resolução directa dos sistemas de equações de derivadas parciais que regem os fenómenos, tendo em consideração as necessárias condições de fronteira [44]. Acompanhando a evolução do Homem, as estruturas construídas pelo mesmo foram-se tornando mais complexas na sua análise e projecto. Esta complexidade resultaria numa demora associada à resolução de grandes sistemas de equações [45]. Devido à morosidade proveniente desta complexidade, tornava-se muito atractiva a substituição do problema real por outro semelhante, de modo a se poder recorrer a resultados publicados em tabelas ou ábacos. Com o grande desenvolvimento que o MEF sofreu na década de 60 [21], e com a banalização do recurso ao computador [21], passou a ser prática corrente a análise ser feita através de um modelo em computador.

O Método dos Elementos Finitos baseia-se numa subdivisão de sistemas físicos discretos ou contínuos. O domínio físico é dividido em subdomínios a que se dão o nome de elementos finitos. Cada elemento finito é definido por um número determinado de nós que dão forma ao elemento. Os vários nós que constituem o elemento são ligados entre si para que o elemento seja fechado, i.e. formam uma fronteira [44].

4.2. Criação de um modelo de elementos finitos

A cada elemento finito estudado isoladamente aplica-se a teoria clássica de cálculo, que detém uma forma previamente determinada (triângulos, rectângulos), estabelecendo as condições de contorno e equilíbrio através dos nós. Esta discretização da estrutura permite a sua resolução produzindo um sistema de equações lineares que se aplicam facilmente a qualquer outra estrutura por mais complicada que sejam as suas características geométricas e condições de cargas. Para levar a cabo tal condição, necessita-se de um grande número de operações matemáticas que, devido à natureza repetitiva, adaptam-se perfeitamente à programação numérica e sua resolução [42].

Em geral, dado que o método de cálculo com elementos finitos é um procedimento aproximado, a precisão obtida aumenta directamente com o número de elementos utilizados, levando a aumentar o seu número de nós mas só até se atingir o seu limite óptimo. Consequentemente, quanto maior for o número de elementos mais elevado será o seu tempo de cálculo, tornando-se inviável na maior parte das situações.

Mediante essa situação, é vantajoso em certos casos utilizar um maior número de elementos de modo a obter um estudo mais detalhado nas zonas críticas do componente, i.e. em zonas onde se prevê que possa ocorrer concentração de tensões [41]. Esta discretização resulta numa análise eficaz e reduz o tempo de cálculo sem perder precisão. Não é possível idealizar o número de elementos necessários para se obter soluções satisfatórias, pois depende sempre da estrutura do componente em estudo. A escolha da subdivisão mais vantajosa resulta da experiência adquirida em analisar resultados de ensaios [40].

As cargas externas aplicadas à estrutura substituem-se por sistemas de forças equivalentes concentradas nos nós. Se existirem cargas pontuais há que se distribuir a malha de maneira que os nós coincidam com os pontos de aplicação.

4.3. Tipos de análise

Quando nos deparamos com o estudo de uma estrutura/componente, devemos primeiramente classificar o problema em termos de geometria, e o tipo de análise a efectuar. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Estas simplificações deverão ser feitas em certa medida no tipo de análise a efectuar. As análises podem ser dos seguintes tipos [21]:

- ⇒ Análise dinâmica;
- ⇒ Análise estática;
- ⇒ Análise linear;
- ⇒ Análise não linear;

4.3.1. Análise Estática/Dinâmica

As acções sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise duma estrutura teria de necessariamente ter em consideração os efeitos dinâmicos. Todavia, em muitas situações é razoável considerar que as acções são aplicadas dum modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise denomina-se estática [21].

4.3.2. Análise Linear/Não linear

Na análise duma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas acções exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, ou seja, todo o estudo é feito com base na geometria inicial não deformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica [21].

Neste trabalho, a análise linear estática foi a escolhida para realizar as simulações devido ao facto de querer-se estudar o comportamento (linear elástico) do sistema de fixação indirecta modelado, quando sujeito a cargas que não variam ao longo do tempo, retirando depois as suas deformações, tensões, etc. atingidos pela simulação.

4.4. Descrição do *software* ANSYS®

Primeiramente à apresentação das modelações computacionais implementadas neste trabalho, é essencial realizar uma breve descrição genérica do *software* de elementos finitos escolhido *ANSYS® v11*. Assim far-se-á, seguidamente, uma abordagem introdutória relativa a alguns tópicos constantes do manual deste *software* ([46], [47]) que tornam mais simples a compreensão dos modelos implementados e referidos neste capítulo.

Uma análise completa executada em ANSYS® está dividida em três etapas distintas: pré-processamento ("*Preprocessor"*), solução ("*Solution*"), e pós-processamento (*"Postprocessor"*). Estas três etapas são ligadas entre si por meio de ficheiros, específicos, e segundo a ordem de processamento:

- *Pré-processamento*: etapa onde se define o modelo do problema físico, i.e. define-se os *keypoints*, as linhas, as áreas e os volumes. Também se define o tipo de elemento, material, e as suas propriedades geométricas. Introduz-se as linhas de malha, áreas e volumes se tal for exigido. A quantidade de detalhes necessários à modelação dependerá da dimensão da análise, ou seja, uma dimensão, duas dimensões, axi-simétrica, e a três dimensões.

- *Solução*: etapa onde se especifica as solicitações exteriores actuantes na estrutura (forças ou pressões), os seus constrangimentos de translação e rotação (condições de fronteira) e, por fim resolver o conjunto resultante de equações escolhidas.

- *Pós-processamento*: por fim chegamos à etapa onde se processa e visualiza-se os resultados obtidos da análise. Pode-se observar as listas de deslocamentos dos nós, os elementos de forças e momentos, os gráficos da estrutura deformada, os diagramas de contorno a cores, animações, etc.

O ANSYS® é uma ferramenta computacional de alto desempenho, que oferece várias modificações, tornando possível criar um novo elemento e ajustar o cálculo para as necessidades individuais [48]. Na análise de um problema físico, o *software* vai requerer várias informações:

- *Construção do modelo (geometria)* – cria-se neste ponto a geometria do modelo a analisar, podendo ser a 2D (áreas ou linhas) ou 3D (volumes), através da inserção de *keypoints* por um sistema de coordenadas, correspondendo às dimensões do modelo, define-se o tipo de elemento a utilizar (viga, placa, sólido, contacto, etc.), as suas constantes reais se forem necessárias introduzir (neste trabalho não foi necessário), as propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, densidade, coeficiente de *Poisson*, entre outros), e a disposição dos elementos estruturais (coordenadas nodais). O conjunto de dados e forma do modelo geram uma malha de elementos, malha essa que vai condicionar a exactidão dos resultados a obter. Uma maior densidade de malha acarta um maior tempo de utilização do computador para a análise, pois os elementos da malha convergem para uma solução única.

- *Aplicação de cargas, condições fronteira e obtenção de solução* – neste passo aplica-se o carregamento da estrutura, podendo ser através de cargas pontuais, cargas de pressão em superfícies, forças de corpo (força da gravidade), e cargas térmicas. As condições fronteiras são aplicadas para constranger o modelo em secções específicas de modo a não se movimentarem ou a executarem deslocamentos específicos. Após esse processo inicia-se a resolução do modelo.

- *Visualização dos resultados* – após a resolução da simulação, procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos, através de listas, gráficos ou animações dos resultados (deformadas, tensões, deslocamentos, esforços, etc.).

4.5. Simulação no *software* ANSYS®

Neste subcapítulo descreve-se as simulações efectuadas no *software* ANSYS®. Estudou-se para o mesmo sistema de fixação indirecta dois tipos de materiais diferentes (granito Amarelo de Vila Real (AVR), e o Cinzento de Alpalhão (SPI)), e para cada um dos materiais, dois tipos de ligação (bucha química (BQ), e camisa polimérica (CP)).

4.5.1. Geometria do modelo e seu sistema de fixação indirecta

Modelou-se no ANSYS® a geometria do provete de pedra natural e o seu sistema de fixação indirecta de acordo com as dimensões apresentadas anteriormente nas Figs. 12 a 14. Na modelação da geometria decidiu-se simplificar tendo-se presente a condição de simetria ao longo do plano YZ, que permite reduzir o tempo de simulação

Iniciou-se a construção da geometria pela criação de uma área rectangular que corresponde a metade da peça referente à pedra natural, de seguida utilizou-se a ferramenta de extrusão (*extrude*) da referida área ao longo do eixo Z de modo ao ANSYS® perceber que o volume gerado é único, ou seja o bloco comporta-se como um só componente (representado pela cor cinzenta na Fig.17 (a)). Assim evitou-se utilizar as ferramentas *glue*, *overlap*, para a geração do modelo da pedra.

A modelação dos volumes referentes à cavilha de aço, camisa polimérica (CP) e bucha química (BQ) foram gerados por métodos diferentes, devido ao modo como a CP e a BQ interagem com os seus pares, presentes na Tab.4.

Tabela 4. Identificação do tipo de pedra natural e o tipo de ligação

Numeração	Tipo de Pedra	Tipo de Ligação entre Cavilha e Pedra
1	Amarelo Vila Real (AVR)	Camisa Polimérica (CP)
2	Amarelo Vila Real (AVR)	Bucha química (BQ)
3	Cinzento Alpalhão (SPI)	Camisa Polimérica (CP)
4	Cinzento Alpalhão (SPI)	Bucha química (BQ)

Para os casos 1 e 3 da Tab.4 considerou-se o modo de contacto entre os materiais como não colado efectuando uma análise linear estática com elementos de contacto entre os materiais.

Seguindo essa orientação retirou-se (furou-se) do volume da pedra um volume cilíndrico para inserir-se os volumes referentes à CP (cilindro oco com espessura) e cavilha de aço (cilindro cheio) nas dimensões presentes na Fig.17 (b). A geração dos volumes foram efectuadas do mesmo modo que o volume da pedra, i.e. gera-se a área correspondente e depois usa-se a ferramenta de extrusão (*extrude*) criando o volume correspondente. No final ficamos com “três volumes” distintos cada um com as suas linhas e *keypoints*, na Fig.17 apresenta-se o modelo descrito.

Nos casos 2 e 4 da Tab.4 assumiu-se um modo de contacto entre os materiais como completamente colado executando uma análise linear estática sem elementos de contacto.

Deste modo a geração dos volumes foi através da criação de áreas e a extrusão das mesmas com uma diferença assinalável, utilizou-se a ferramenta *merge* do ANSYS® que fez com que o modelo todo passasse a comportar-se com um “volume único” mesmas linhas e *keypoints* entre os materiais diferentes, na Fig.18 ilustra-se o modelo.

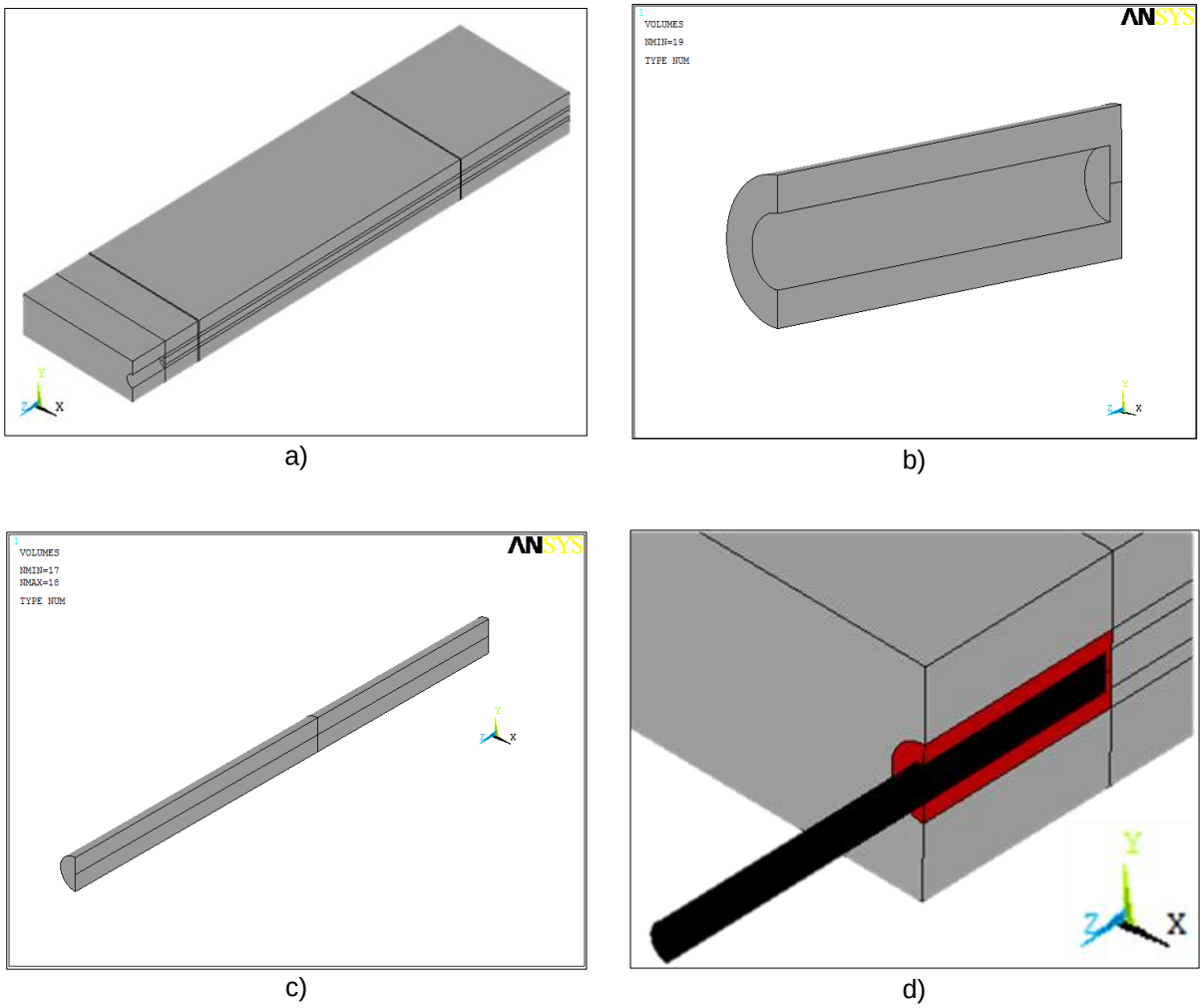


Figura 17. Volumes gerados referentes aos casos 1 e 3: a) Volume da pedra natural; b) Volume da CP; c) Volume da cavilha de aço; d) Modo de encaixe dos três volumes gerados.

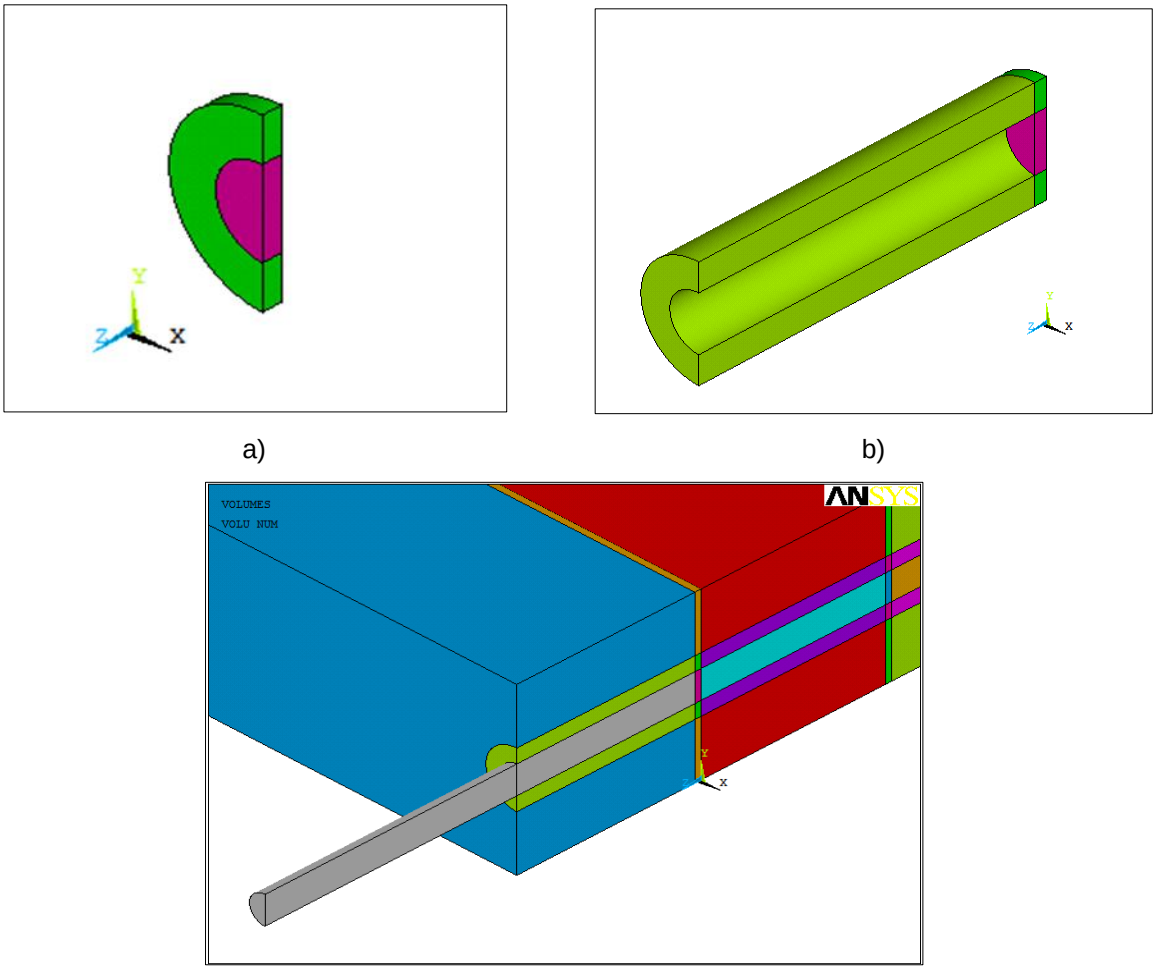


Figura 18. Volumes gerados referentes aos casos 2 e 4: a) Volume gerado das áreas correspondentes à BQ e cavilha; b) Volume final para a BQ; c) Modo de encaixe dos três volumes criados e que se comportam como um só após o *merge*.

A Fig.19 ilustra as dimensões finais dos provetes modelados no *software* ANSYS®. A Fig.19 (a) para a geometria do granito, e a Fig.19 (b) para a CP/BQ e cavilha de aço.

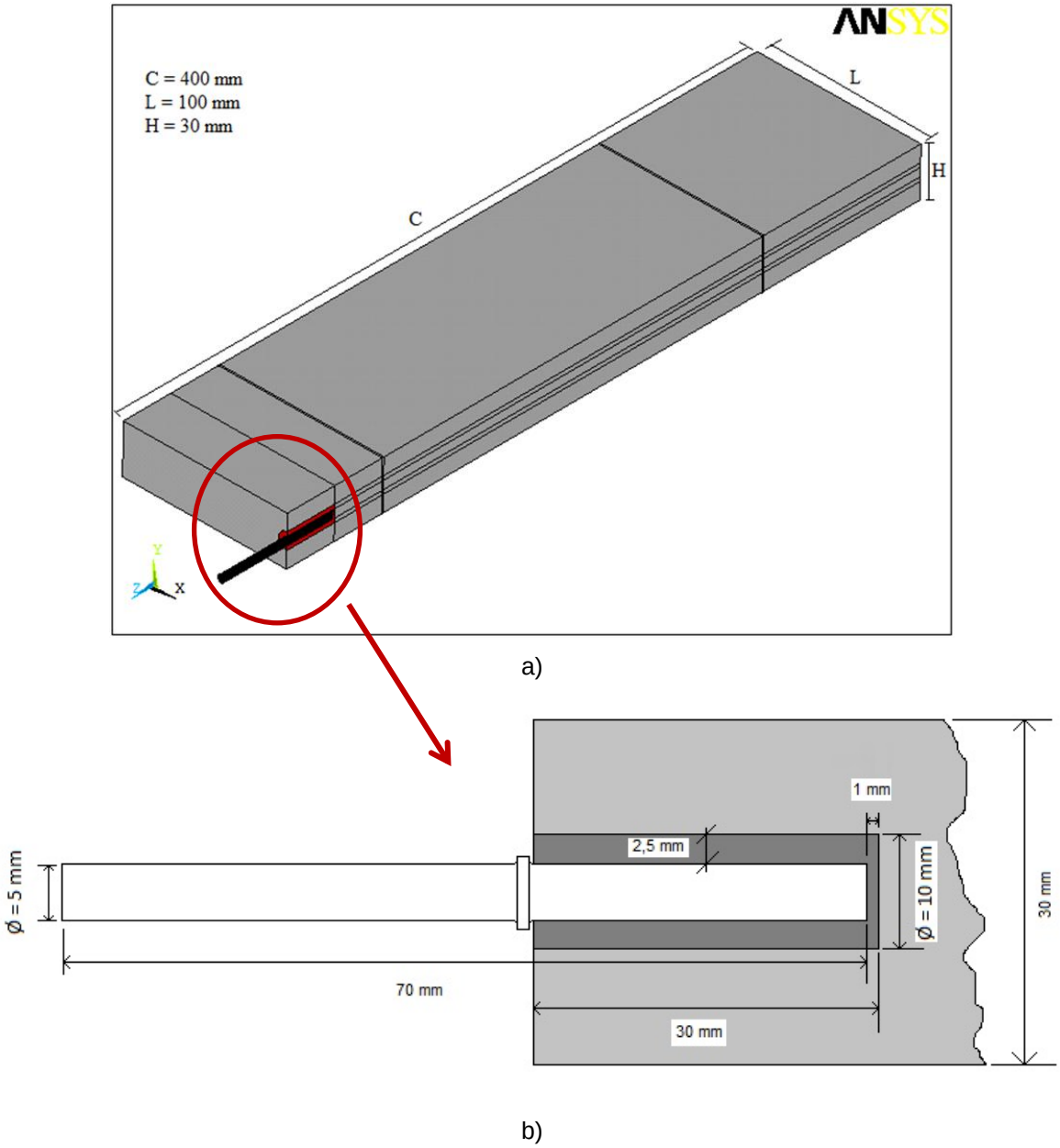


Figura 19. Dimensões dos provetes: a) Pedra natural; b) Cavilha de aço e camisa.

4.5.2.Caracterização dos elementos

► Para o conjunto placa+cavilha+camisa: SOLID 95

O elemento *SOLID95* é um sólido estrutural, 3-D, de 20 nós (Fig.20), permite formas irregulares sem perder a sua precisão, os elementos *SOLID95* têm formas de deslocamento compatíveis e são apropriados para fronteiras curvas. O elemento é definido por 20 nós, cada um com três graus de liberdade: translação nas direcções nodais X,Y, Z.

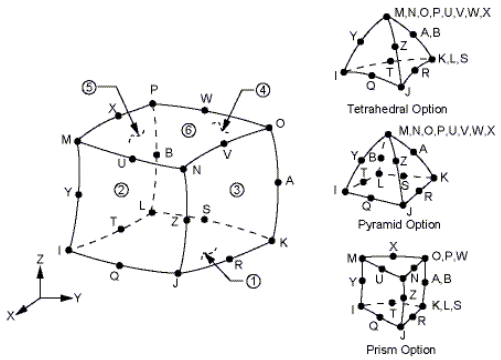


Figura 20. Representação do elemento SOLID95.

► Para o elemento de contacto: CONTA 174

O elemento *CONTA174* é um elemento de contacto de superfície-a-superfície, 3-D, de 8 nós, exemplificado na Fig.21 é utilizado para simular o contacto e o escorregamento entre superfícies alvos em 3-D e uma superfície deformável, definida por este elemento. Este elemento encontra-se localizado nas superfícies dos elementos de sólidos escolhidos anteriormente. Possui as mesmas características geométricas que a face do elemento sólido pelo qual está conectado. O contacto ocorre quando o elemento de superfície penetra num segmento da superfície alvo. Este elemento permite tensões de corte, e atrito de *Coulomb*.

► Para o elemento de alvo: TARGE 170

O elemento *TARGE170*, 3-D (Fig.21) é utilizado para representar as superfícies alvo correspondente aos elementos de contacto. Esta superfície alvo é discretizada por um conjunto de segmentos das superfícies alvo e emparelhadas com as superfícies contacto associadas por um conjunto de constantes reais definidas pelo utilizador.

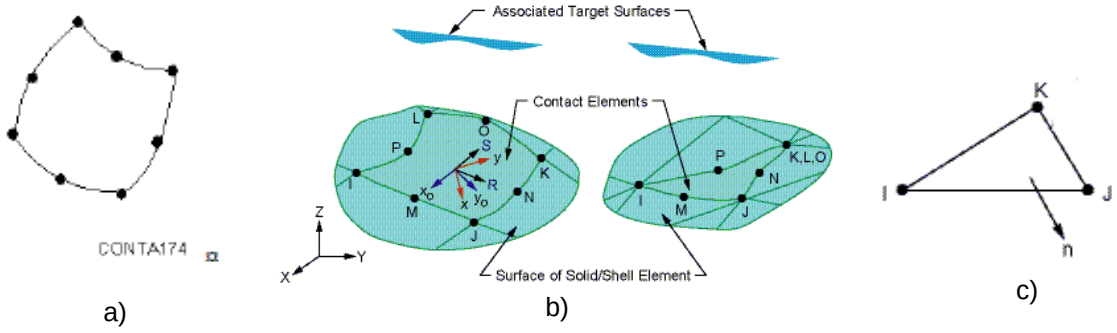


Figura 21. Representação dos elementos: a) CONTA174; b) par CONTA174_TARGE170; c) TARGE170.

4.5.3.Caracterização dos materiais

De acordo com a análise linear estática com e sem elementos de contacto, as características físico-mecânicas dos materiais escolhidos recaiu sobre o Módulo de Young, e o Coeficiente de Poisson de cada material para utilização no *software* ANSYS®.

As propriedades mecânicas que se adoptaram para os materiais estão resumidas na Tab.5. Os valores do Módulo de Young para os granitos foram obtidos em laboratório, sendo apresentados mais adiante no capítulo 5 (Resultados e Discussões). Em relação aos materiais restantes assim como os seus Coeficientes de Poisson foram assumidos para este trabalho.

Tabela 5. Características dos diferentes materiais a inserir no *software* ANSYS®

Material	Módulo de Young (GPa)	Coeficiente de Poisson (*v*)
Granito Amarelo Vila Real (AVR)	14,05	0,3
Granito Cinzento de Alpalhão (SPI)	38,77	0,3
Cavilha de aço AISI 316	193	0,27
Camisa Polimérica	0,44	0,4
Bucha Química Pattex	0,5	0,2

4.5.4.Definição dos parâmetros para a análise de contacto

Introdução

A análise de contacto foi considerado apenas para o caso da condição de ligação entre a cavilha de aço com a pedra pela aplicação de uma camisa polimérica (CP). É uma abordagem importante na realização deste trabalho, no modo de se tentar recriar o mais próximo possível ao nível computacional, o que sucede ao nível experimental com a aplicação de uma camisa polimérica.

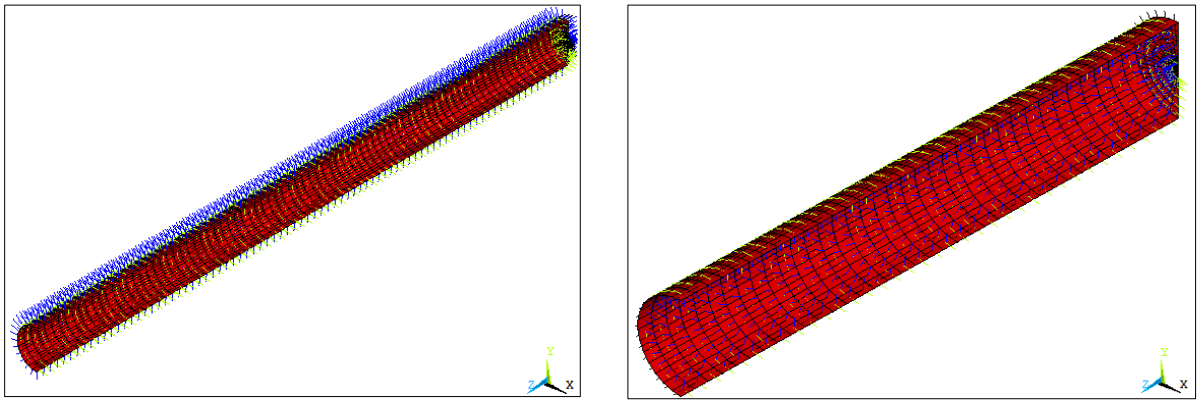
Selecção das superfícies de contacto e alvo

Para o contacto superfície-superfície, o primeiro passo é especificar qual das superfícies é contacto e qual é o alvo. Eles devem ser seleccionados como um par, e partilhar o mesmo valor numérico *real constant*. A escolha das superfícies foi de acordo com as seguintes indicações referidas no manual de contacto do ANSYS® [43];

- Se uma superfície convexa está prevista entrar em contacto com uma superfície plana ou côncava, a superfície plana/côncava deve ser a superfície alvo;
- Se uma superfície tem uma malha superficial fina, e em comparação, a outra superfície tem uma malha grossa, a malha fina deve ser a superfície de contacto e a da malha grossa deve ser a superfície do alvo;
- Se uma superfície é mais rija do que a outra, a superfície menos rija deve ser a superfície de contacto e a mais rija a superfície alvo;
- Se elementos de ordem-superior determinam uma das superfícies externas e elementos de baixa-ordem determinam a outra superfície, a superfície com os elementos de ordem-superior devem ser a superfície de contacto e a outra superfície deve ser a superfície alvo. No entanto, em 3-D,com contacto nó-superfície, os elementos de ordem inferior devem ser a superfície de contacto, e os elementos de ordem superior devem ser a superfície alvo;
- Se uma superfície é acentuadamente maior do que a outra superfície, como no caso em que uma superfície envolve a outra superfície, a superfície maior deve ser a superfície do alvo.

Neste trabalho escolheu-se dois pares de contacto:

- O primeiro par de contacto (Fig.22 e Fig.23) tem como superfície de contacto a área de superfície exterior da cavilha de aço (geometria convexa) visualizada na Fig.22 (a), para a área de superfície interior do cilindro que representa a camisa polimérica (geometria côncava) como superfície alvo Fig.22 (b). Na Fig.23 está representado o conjunto referente ao 1º par de contacto.



a) b)

Figura 22. Normais de contacto do 1º par seleccionado: a) Elemento de contacto; b) Elemento alvo.

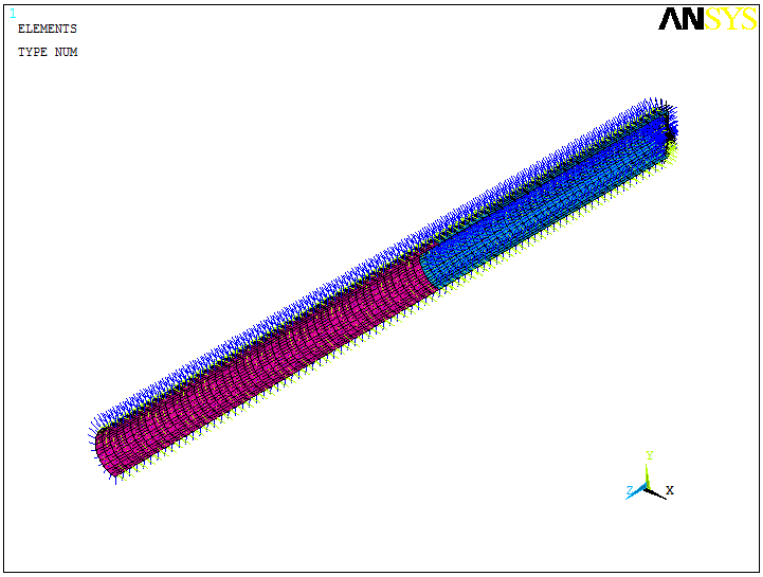
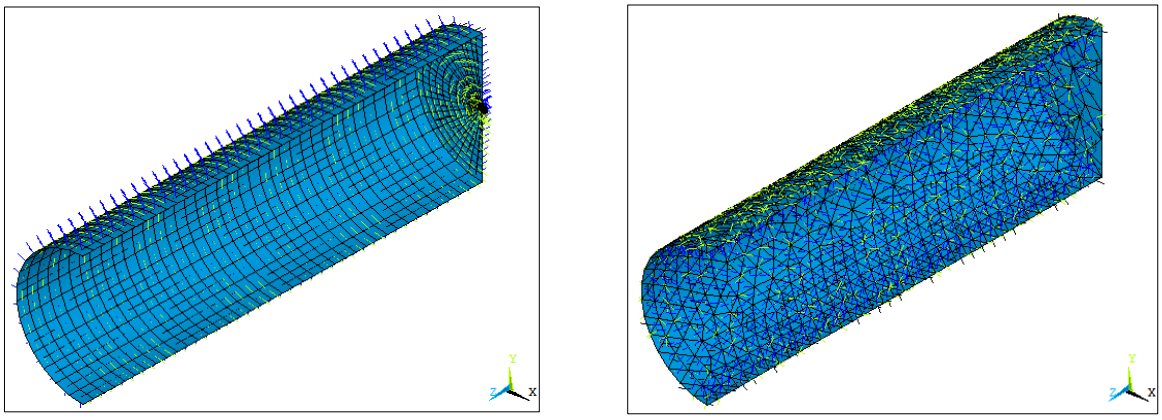


Figura 23. Conjunto dos elementos do 1º par de contacto.

- O segundo par de contacto (Fig.24 e Fig.25) foi entre a área de superfície exterior do cilindro representativo da camisa polimérica (geometria convexa) como superfície de contacto (Fig.24 a)), para a área de superfície interior que representa o furo executado na pedra natural (geometria côncava) (Fig.24 b)). Na Fig.25 está representado o conjunto referente ao 2º par de contacto.



a) b)

Figura 24. Normais de contacto do 2º par seleccionado: a) Elemento de contacto; b) Elemento alvo.

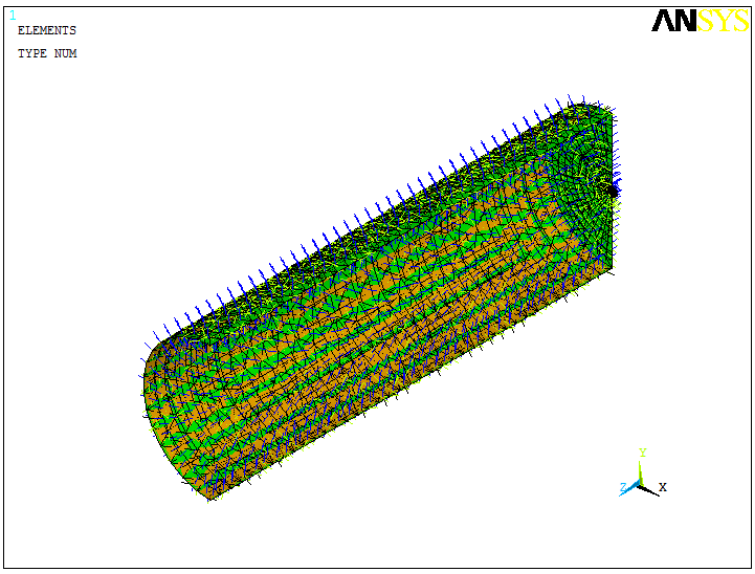
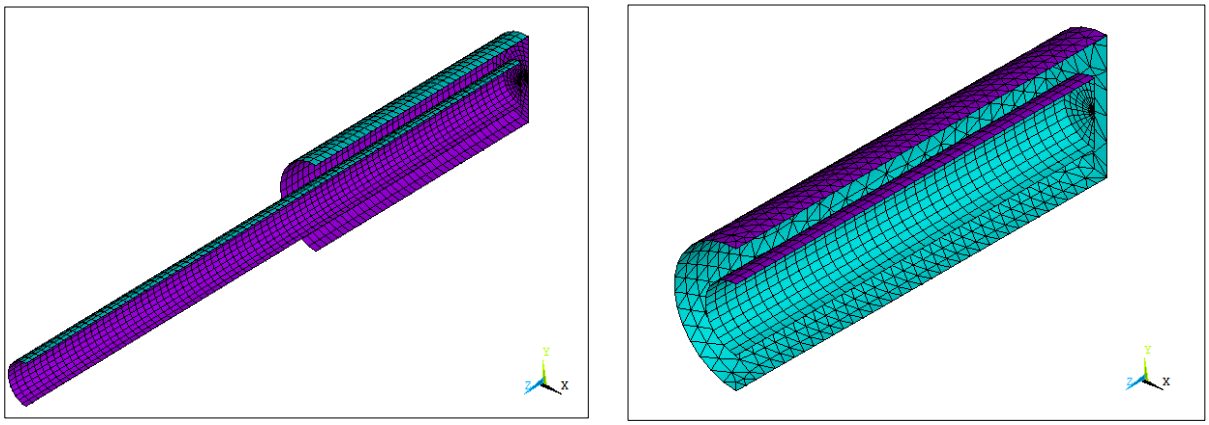


Figura 25. Conjunto dos elementos do 2º par de contacto.

Escolheu-se assim a característica referente à geometria convexa/côncava para escolher os pares, pois tentativas efectuadas na escolha por rigidez e tamanho da geometria dos sólidos a simular, foram resultando em erros assinalados pelo ANSYS®, não sendo possível continuar a simulação pretendida.



a) b)

Figura 26. Área dos elementos seleccionados no ANSYS®: a) CONTA174; b) TARGE170.

A Fig.26 ilustra as áreas seleccionadas para aplicação dos elementos de contacto *CONTA174* (a) e *TARGE170* (b).

Propriedades de contacto

Para as propriedades de contacto entre os diferentes elementos, decidiu-se alterar apenas os coeficientes de atrito entre os pares de contacto.

A Tab.6 apresenta os valores assumidos para os dois pares.

Tabela 6. Propriedades de contacto inseridas no ANSYS®

Tipo de Ligação	Par de Contacto	Coeficiente de Atrito
Camisa Polimérica	Camisa – Aço	0,2
	Camisa – Pedra	0,5

Carregamento e Condições de Fronteira

Como já foi mencionado, a geometria do modelo considerado para análise numérica foi simplificada para metade, não sendo desprezado as condições reais imposta pela norma relativa aos ensaios de arrancamento.

Devido à condição de simetria, apenas metade da geometria inicial foi analisada. Foi aplicada a condição de fronteira de simetria (*Symmetry B. C.*) nas áreas pertencente ao plano de simetria.
Aplicou-se na área de superfície exterior da cavilha de aço uma restrição a todos os graus de liberdade, para simular a fixação da cavilha efectuada no laboratório.

O apoio da placa ensaiada experimentalmente foi representado no ANSYS® pela inserção de um apoio simples, restringindo o deslocamento na direcção UY numa área de secção 100 mm^2.

Ao nível do carregamento foi através da aplicação de uma força na direcção do eixo Y (F_y [N]) aplicada nos nós pertencentes à linha definida para aplicação do carregamento, linha que simula o punção actuador da máquina de ensaios. Na Fig.27 visualiza-se os constrangimentos, apoios, forças aplicadas e condições de simetria.

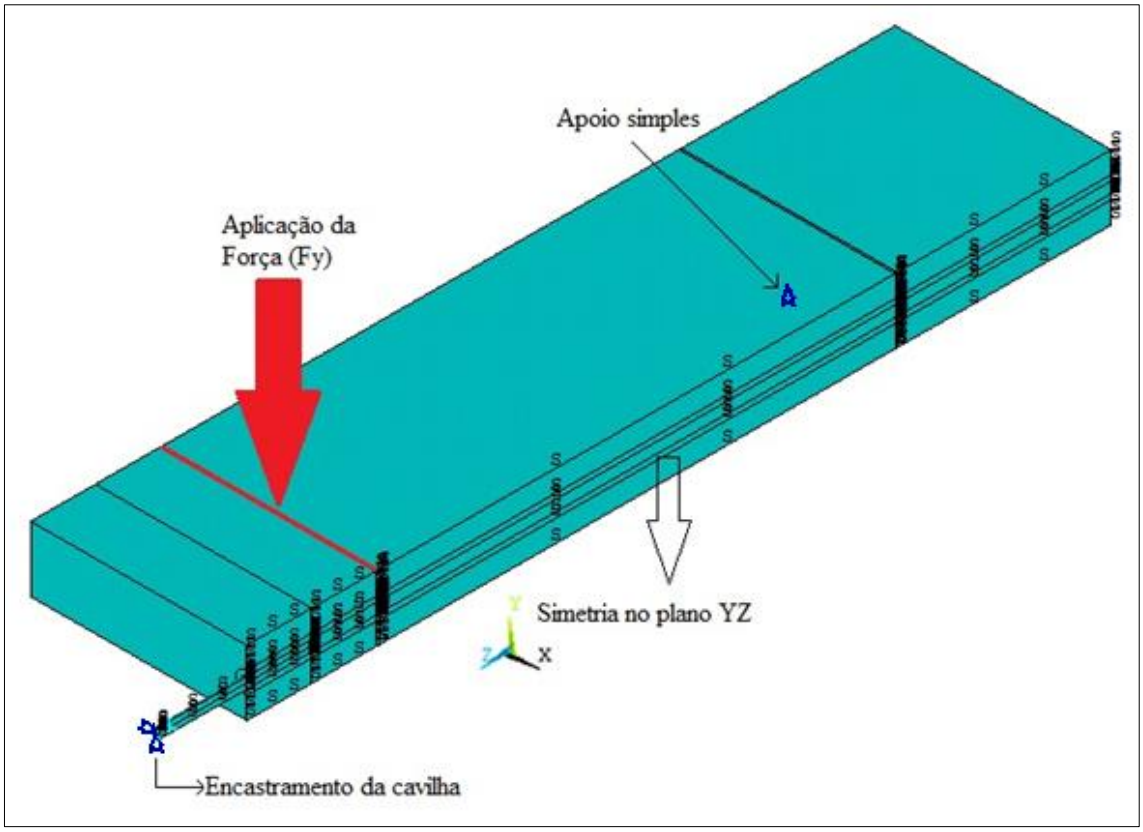


Figura 27. Representação dos constrangimentos, apoios, cargas aplicadas e condições de simetria

Malha de Elementos Finitos

A construção da malha do modelo é talvez o passo mais importante na simulação, pois a sua geração pode originar grandes ou pequenas percentagens de erro entre os elementos influenciando os valores obtidos. A existência de muitos ou poucos elementos tem influência directa no tempo de simulação do projecto.

Devido à conjugação de simular 3 tipos de material simultaneamente, ao contabilizar-se a percentagem de erro da malha pelo uso da ferramenta ERNORM (cálculo do erro de energia de deformação estrutural de cada elemento), isto não foi possível pois o *software* anunciava erro no cálculo da percentagem.

Assim decidiu-se construir uma malha (Fig.28) em que os elementos de 20 nós, hexaédricos fosse o mais adequado em estrutura possível, i.e. o elemento cubico apresentasse uma estrutura o mais cubica possível. Utilizou-se a ferramenta varrimento (*sweep*) para formar a malha em todas as geometrias. A ferramenta varrimento (*sweep*) gera malhas utilizando uma face ou vértice como ponto de origem, varrendo depois a malha ao longo de um trajecto finalizando num vértice ou face alvo mantendo a forma do elemento.

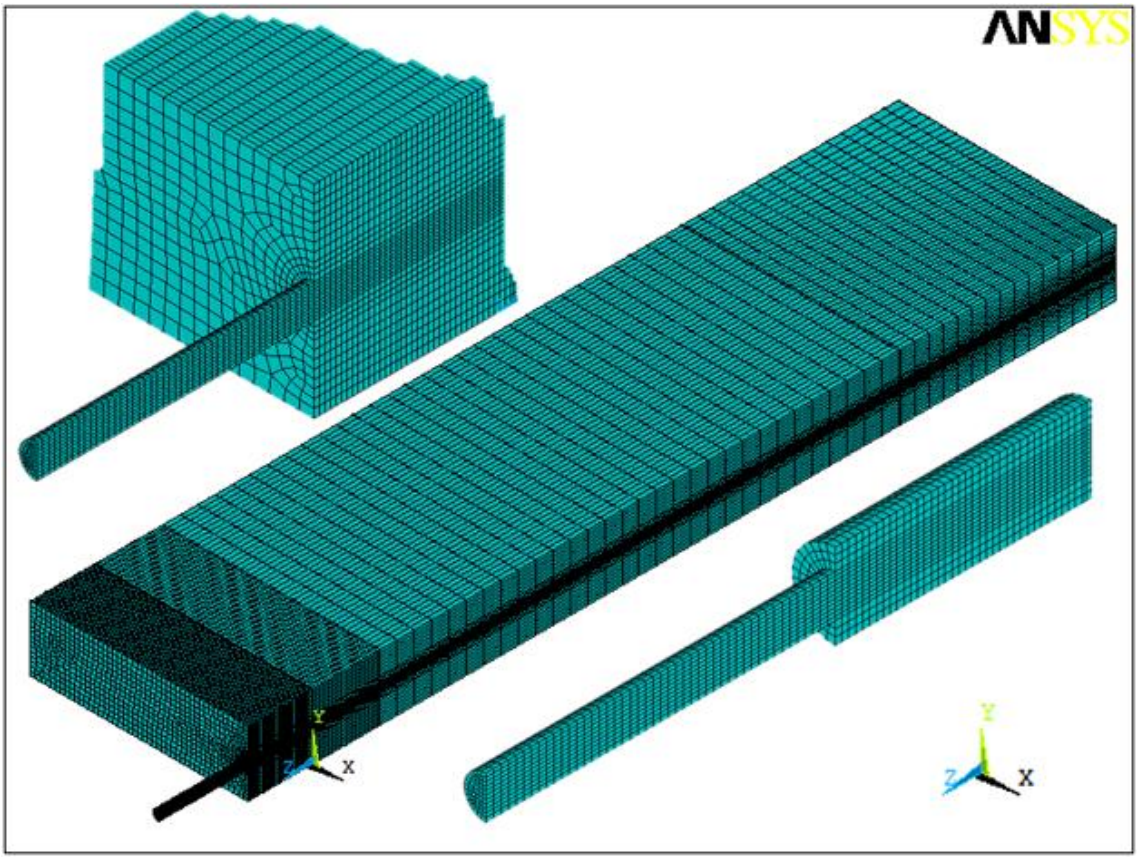


Figura 28. Malha gerada com utilização da ferramenta *sweep* no modelo todo.

Ao correr o modelo com a malha gerada por varrimento (*sweep*) esta consumia muito tempo de simulação (mais de 24h). Assim procurou-se uma forma de reduzir o tempo de simulação.
Uma nova malha foi gerada (Fig.29), através da opção malha livre (*free mesh*) somente na geometria referente à pedra. A malha gerada nas zonas da cavilha de aço e CP/BQ foi por varrimento (*sweep*) para uma melhor análise.

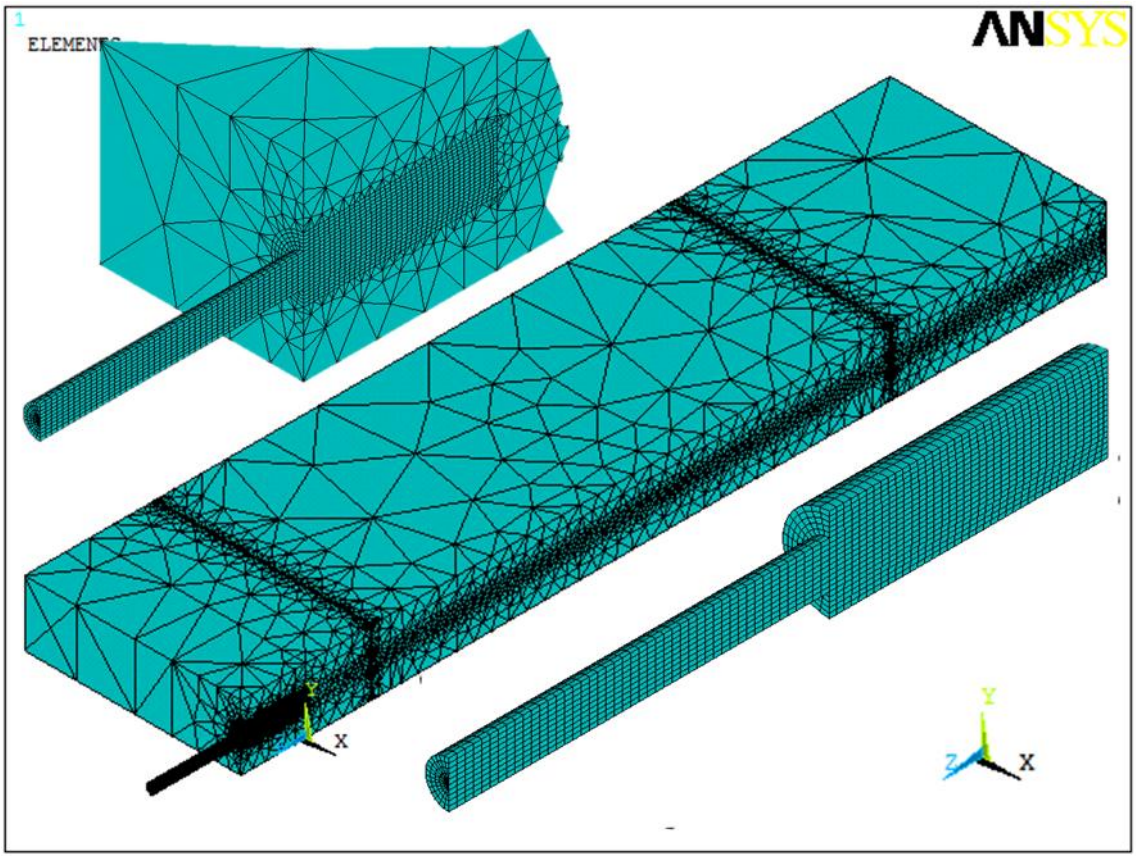


Figura 29. Ilustração referente à malha do modelo a simular.

Uma nova malha foi gerada (Fig.29), através da opção malha livre (*free mesh*) somente na geometria referente à pedra. A malha gerada nas zonas da cavilha de aço e CP/BQ foi por varrimento (*sweep*) para uma melhor análise.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

5.1. Pedras naturais

A elaboração dos testes experimentais enunciados anteriormente, para os provetes de pedra natural, permitiu chegar aos resultados expostos neste subcapítulo.

As Tabs.7 e 8 resumem as características físico-mecânicas obtidas pelos provetes utilizados nos ensaios experimentais. Apresentam-se os valores referentes à sua média e desvio padrão.

Tabela 7. Resultados das propriedades físico-mecânicas dos provetes de granito seleccionados

Características Mecânicas		
Granito	**Amarelo Vila Real (AVR)**	**Cinzento Alpalhão (SPI)**
Resistência à Flexão em Carga Centrada (3 pontos) (MPa)	6,0	20,8
Desvio Padrão (MPa)	0,24	1,21
Resistência à Flexão em Momento Constante (4 pontos) (MPa)	6,7	15,5
Desvio Padrão (MPa)	0,74	1,38
Resistência à Tracção em Flexão (MPa)	3,92	8,50
Desvio padrão (MPa)	0,90	0,43
Módulo de Young (GPa)	14,1	38,8
Desvio Padrão (GPa)	1,01	1,95

Analisando os valores obtidos para a população dos dois tipos de granito verifica-se que o AVR apresenta valores médios da resistência à flexão em momento constante de 6,7 ± 0,74 MPa, para a resistência por carga centrada de 6,0 ± 0,24 MPa, na resistência à tracção de 3,92 ± 0,90 MPa.

O SPI atingiu 15,5 ± 1,38 MPa de resistência a momento constante, 20,8 ± 1,21 MPa para resistência a carga centrada, e 8,50 ± 0,43 MPa na resistência à tracção.

Comparando os resultados da resistência à flexão pelos três métodos (momento constante, carga centrada, e tracção) o granito SPI atingiu mais que o dobro quando comparado com o granito AVR.

Uma das razões para explicar este comportamento pode estar nas diferenças ao nível da microestrutura de cada granito, resumidas na Tab.8. No caso do AVR verifica-se uma porosidade aberta de 1.67 ± 0.86 %, uma absorção de água a P_{atm} de 0.66 ± 0.34 %. Para o SPI obteve-se 0.92 ± 0.10 % na porosidade aberta e 0.35 ± 0.04 % para absorção de água a P_{atm}.

Outra das razões pode estar contida na rigidez dos granitos, obteve-se para o AVR um módulo de Young de 14,1 ± 1,01 GPa e para o SPI de 38,8 ± 1,95 GPa. Comparando os dois nota-se que o SPI possui mais de o dobro de módulo de Young que o AVR.

Tabela 8. Resultados das propriedades físico-mecânicas dos provetes de granito seleccionados

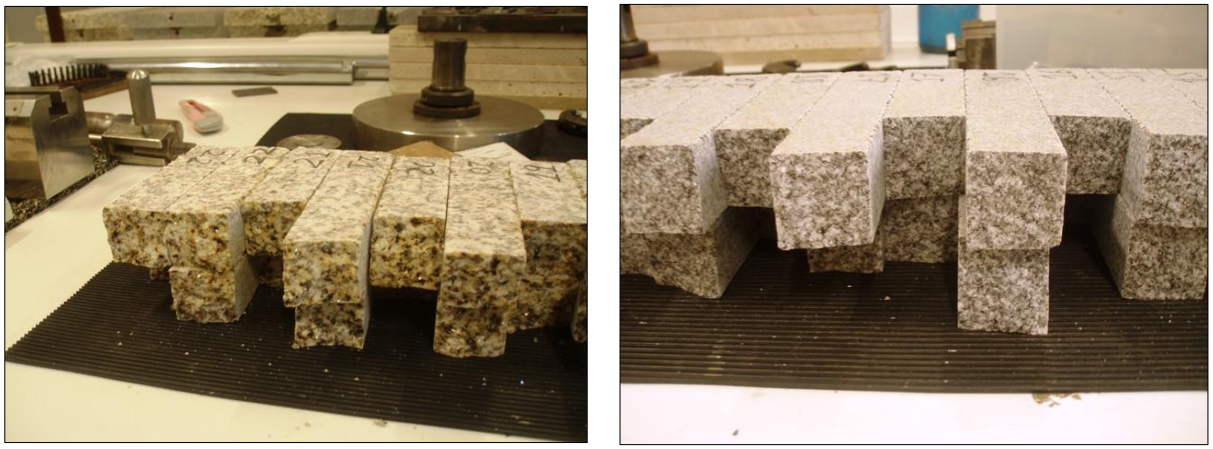
Características Físicas		
Granito	**Amarelo Vila Real (AVR)**	**Cinzento Alpalhão (SPI)**
Densidade Aparente (kg/m^3)	2542	2627
Desvio padrão (kg/m^3)	13,40	2,67
Porosidade Aberta (%)	1,67	0,92
Desvio padrão (%)	0,86	0,10
Absorção de água à P_{atm} (%)	0,66	0,35
Desvio Padrão (%)	0,34	0,04

Analisando-se os valores médios obtidos da população de cada tipo de pedra, verifica-se que no caso da porosidade aberta o granito AVR apresenta um valor mais elevado (1,67 ± 0,86 %) que o SPI (0,92 ± 0,10%). Em termos de absorção de água à P_{atm} novamente, o AVR apresenta-se com valores médios superiores ao SPI (0,66 ± 0,34% para 0,35 ± 0,04%).

Comparando os valores obtidos com os valores anunciados nas Tabs.1 e 2 (Cap.2) entende-se que os granitos seleccionados estão dentro dos valores médios esperados para as suas características.

Os valores apresentados na Tab.8 são meramente informativos e com função de diferenciar os granitos escolhidos, e reforçar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão presentes na Tab.7. De modo a ter-se noção que o Amarelo de Vila Real é caracteristicamente diferente do Cinzento de Alpalhão.

A Fig.30 ilustra a diferença das secções fracturadas nos provetes de cada granito (a) AVR), (b) SPI).



a) b)

Figura 30. Provetes faccionados de cada granito após o ensaio de flexão a momento constante: a) AVR; b) SPI.

Nas Figs.31 a 32, apresenta-se graficamente o comportamento de alguns provetes de cada granito registado nos ensaios de flexão a momento constante (4 pontos).

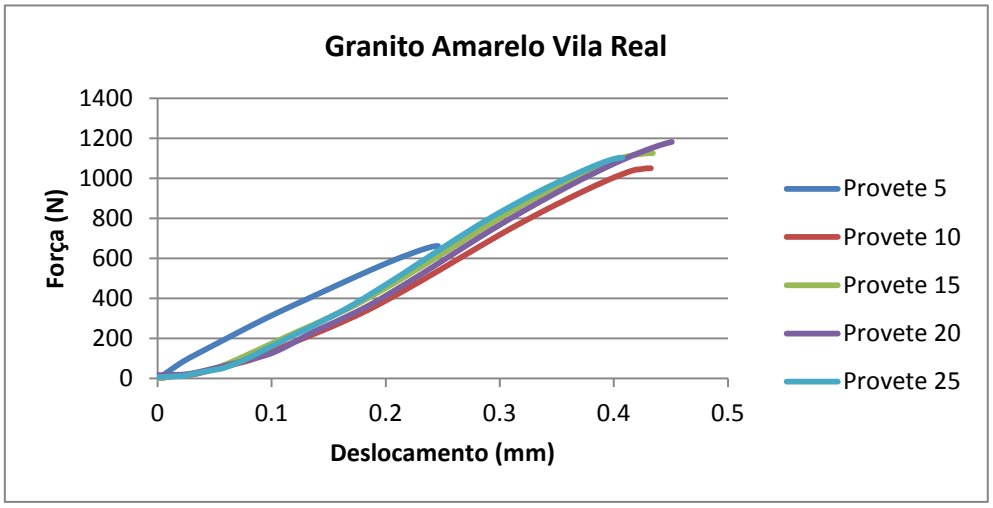


Figura 31. Gráfico força deslocamento para o granito AVR.

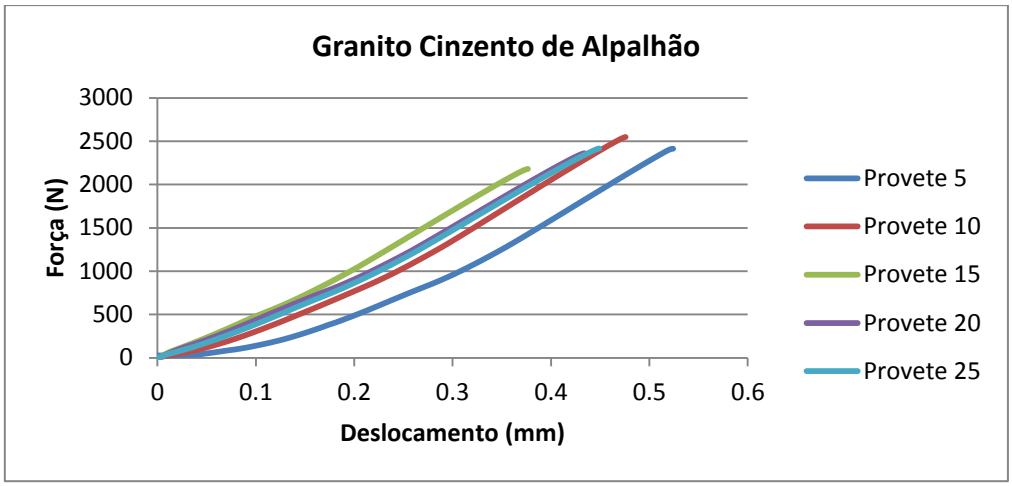


Figura 32. Gráfico força deslocamento para o granito SPI.

É de realçar que o comportamento das pedras ensaiadas à flexão evidenciou o comportamento de materiais frágeis. A ductilidade do material é bastante baixa iniciando o material a sua rotura mal entra no domínio plástico de deformação.

Na Fig.33, é possível observar a representação da distribuição dos valores da resistência à flexão (obtidos no ensaio a momento constante) por população de cada granito seleccionado. Da análise desta distribuição nota-se que, os valores obtidos pelo SPI são cerca do dobro dos valores alcançados para o AVR.

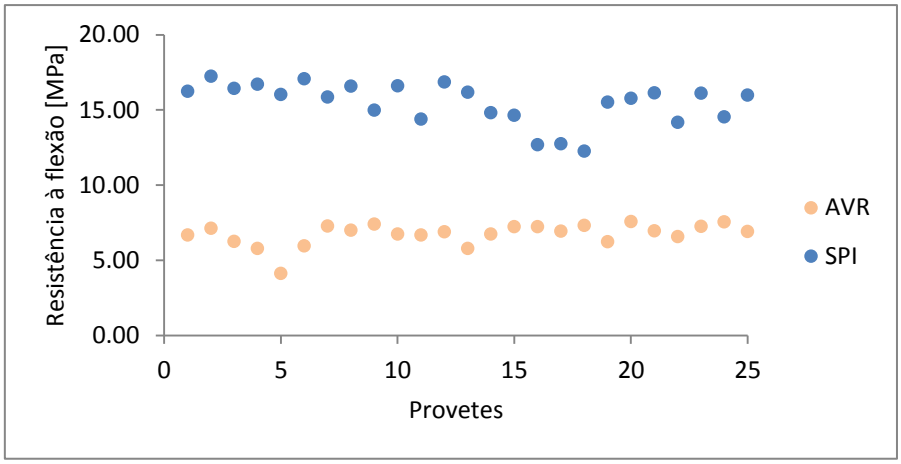


Figura 33. Distribuição dos valores da tensão de rotura por população de cada granito

5.1.1.Ensaios de Arrancamento

Dos ensaios de arrancamento retirou-se, as forças de rotura e visualizou-se as diferenças no destacamento ocorrido na rotura dos granitos pela aplicação da camisa polimérica e da bucha química.

As Tabelas 9,10 e 11 resumem os valores obtidos nos ensaios de arrancamento para os dois modos de ligação entre a cavilha de aço e o granito. A Tab.9 para o caso da camisa polimérica (CP), a Tab.10 para o uso da bucha química (BQ) e a Tab.11 para as forças de cedência, máximas e rigidez do sistema.

Tabela 9. Força de rotura obtida nos ensaios para o uso da camisa polimérica (CP)

Tipo de Contacto	**Força de Rotura**
Camisa Polimérica	**(kN)**
SPI 1A	1.85
SPI 1B	2.05
SPI 2A	1.92
SPI 2B	1.44
SPI 3A	1.56
SPI 3B	1.57
Média	**1.73**
Desvio padrão	**0.24**
AVR 1A	1.29
AVR 1B	1.38
AVR 2A	1.41
AVR 2B	0.98
AVR 3A	1.02
AVR 3B	1.13
Média	**1.20**
Desvio padrão	**0.18**

Comparando os valores obtidos, para SPI e AVR, nos ensaios de arrancamento com camisa polimérica, observa-se que o granito SPI obteve um valor médio da força de rotura de 1,73 ± 0,24 kN, com um valor máximo de 2,05 kN, e um mínimo de 1,44 kN.

Para o granito AVR o valor médio da força de rotura foi de 1,20 ± 0,18 kN, com um máximo de 1,41 kN, e um mínimo de 0,98 kN.

A Fig.34 ilustra o destacamento ocorrido para o ensaio de arrancamento com aplicação da camisa polimérica.

a) b)

Figura 34. Provetes após o fim do ensaio de arrancamento com CP: a) AVR; b) SPI.

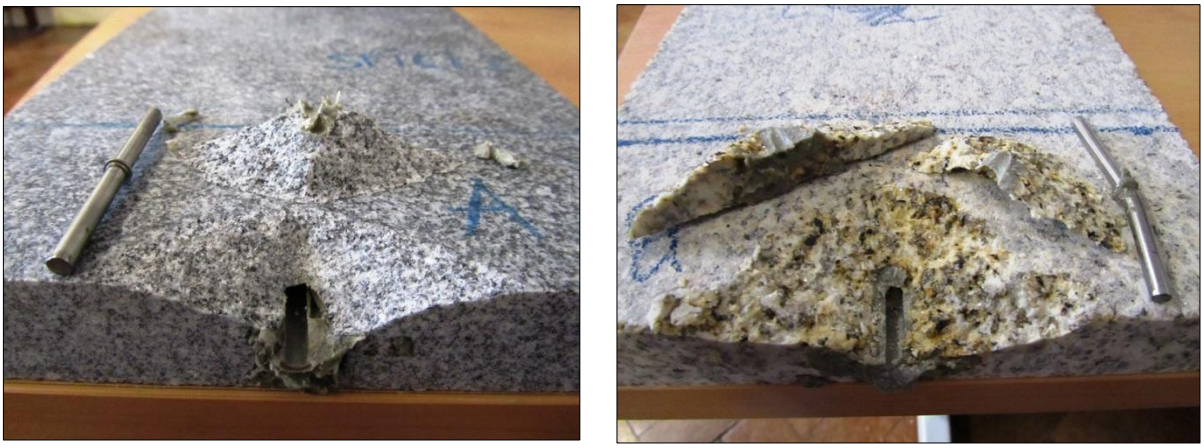
Tabela 10. Força de rotura obtida nos ensaios para o uso da bucha química (BQ)

Tipo de Contacto	**Força de Rotura**
Bucha Química	**(kN)**
SPI 1A	3.28
SPI 1B	3.43
SPI 2A	3.34
SPI 2B	3.24
SPI 3A	3.01
SPI 3B	4.13
Média	**3.40**
Desvio Padrão	**0.38**
AVR 1A	2.67
AVR 1B	1.85
AVR 2A	2.52
AVR 2B	1.92
AVR 3A	2.44
AVR 3B	2.74
Média	**2.36**
Desvio Padrão	**0.38**

Analisando os valores referentes à utilização da bucha química (BQ), verifica-se que o granito SPI obteve um valor médio de 3,40 ± 0,38 kN de força de rotura, atingindo um máximo de 4,13 kN e um mínimo de 3,01 kN.

Para o granito AVR o valor médio da força de rotura é de 2,36 ± 0,38 kN, com um máximo de 2,74 kN e um mínimo de 1,85 kN.

O destacamento ocorrido no ensaio de arrancamento pela aplicação da bucha química apresenta-se na Fig.35.



a) b)

Figura 35. Provetes após o fim do ensaio de arrancamento com BQ: a) SPI; b) AVR.

Comparando os dois tipos de contacto, nos dois granitos, é de realçar que o caso do contacto entre cavilha de aço e CP deu origem a valores de rotura inferiores aos obtidos no caso do contacto cavilha de aço e BQ.

Observando as Figs. 34 e 35 identifica-se que o uso da CP no sistema de fixação indirecta originou roturas com destacamento típicos em cunha transversal menores do que quando se utiliza a BQ.

Analisou-se também a força do sistema de fixação indirecta para as suas variantes: granito – camisa polimérica – cavilha de aço, e granito – bucha química – cavilha de aço.

A análise foi efectuada através da observação dos gráficos força – extensão (Figs.36 e 37) de modo a retirar-se três parâmetros de estudo:

- F_{ced} – força de cedência; força a partir da qual deixa de existir linearidade na curva de ensaio (retirado visualmente);
- F_{Rmax} – força de rotura máxima obtida em cada ensaio;
- R – rigidez do sistema; calcula a partir do declive do gráfico força – extensão num segmento de 20 a 80% da força de cedência (F_{ced}).

Tabela 11. Forças de cedência e máximas dos ensaios de arrancamento dos granitos com CP e BQ

Granito	**AVR**		**SPI**	
Tipo de contacto	**CP**	**BQ**	**CP**	**BQ**
F_{ced} *(N)*	1083	1914	1403	2096
desvio padrão (N)	307	618	445	1042
F_{Rmax} *(N)*	1202	2383	1730	3405
desvio padrão (N)	185	342	24	381
R (N/mm)	357	1118	777	1242
desvio padrão (N/mm)	135	221	156	525

Analisando os valores obtidos (Tab.11) ao nível das forças (cedência e rotura máxima) verifica-se que em ambos os granitos os valores variam de acordo com o tipo de contacto. No caso do uso da CP (Fig.36) os valores são menores (1202±185 N, 1730±24 N) quando comparados com o uso da BQ (Fig.37) (2383±342 N, 3405±381 N) referentes à F_{Rmax}.

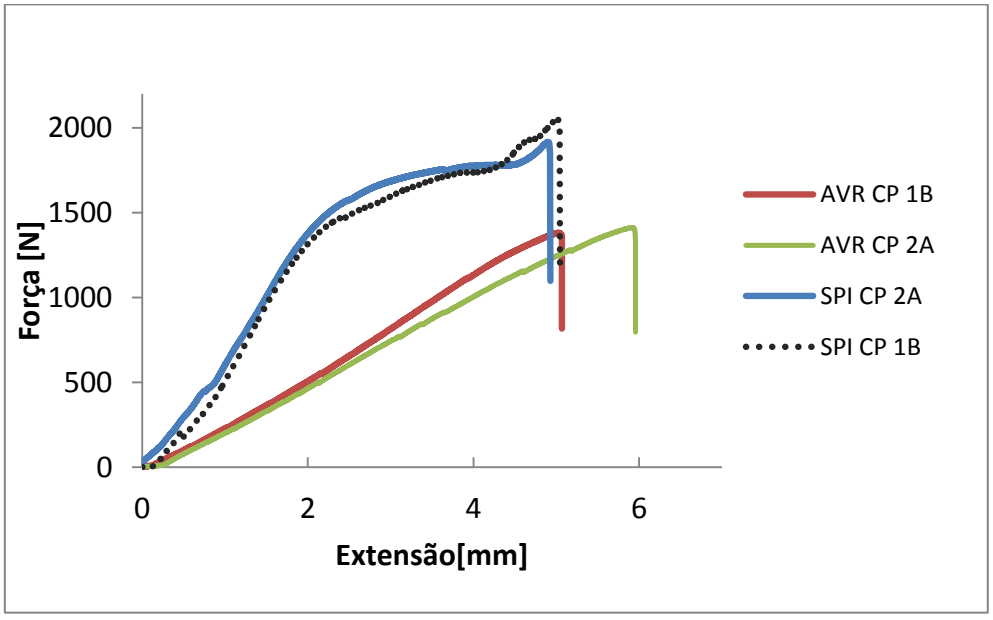


Figura 36. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI com CP.

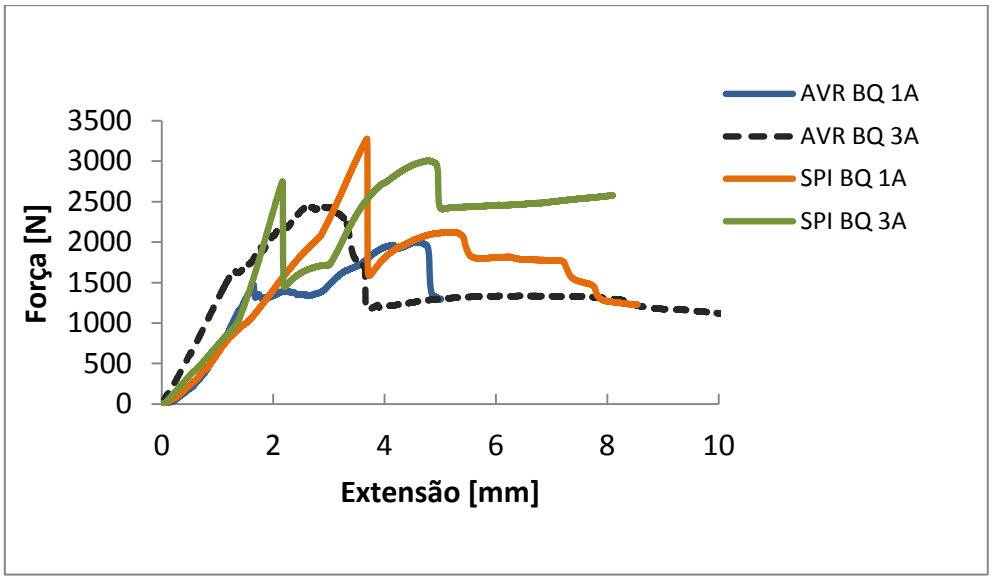


Figura 37. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI com BQ.

Comparando os valores da Tab.11 referentes à rigidez do sistema (R) e analisando por tipo de contacto, verificamos que com o uso da CP existe uma clara diferença entre os granitos estudados (357 N/mm) no AVR e (777 N/mm) no SPI. Esta diferença de valores parece estar relacionada com os diferentes módulos de Young para os granitos (AVR com 14,05 GPa; e SPI com 38,77 GPa). Essa situação é comprovada pela visualização das Figs. 36 e 37.

Analisando a aplicação da BQ notou-se que os valores de rigidez são superiores mas indiferenciáveis na sua ordem de grandeza (Figs. 38 e 39): AVR com 1118 N/mm e o SPI com 1242 N/mm. Isto mostra que o sistema não está a dar a devida importância ao módulo de Young dos granitos.

As diferenças observadas na rigidez do sistema de fixação indirecta com a aplicação de diferentes tipos de contacto CP e BQ levam-nos a admitir que, mediante um módulo de Young próximo em valores para os tipos de contacto (CP: 0,44 GPa; e BQ:0,5 GPa) o tipo de ligação que ocorre no furo efectuado na placa de pedra influencia os valores. Quando se aplica a BQ esta cavidade fica completamente preenchida com a mistura, originando um contacto total (tipo colado, sem liberdade de movimento) entre a pedra-BQ-cavilha de aço. Ao aplicar-se uma força, neste tipo de contacto espera-se que origine um estado de tensões de compressão e tracção.

Por outro lado a aplicação da CP no furo não origina um preenchimento total do furo, não deixando de existir atrito entre os materiais. Quando se aplica uma força apenas o estado de tensão de compressão é esperado.

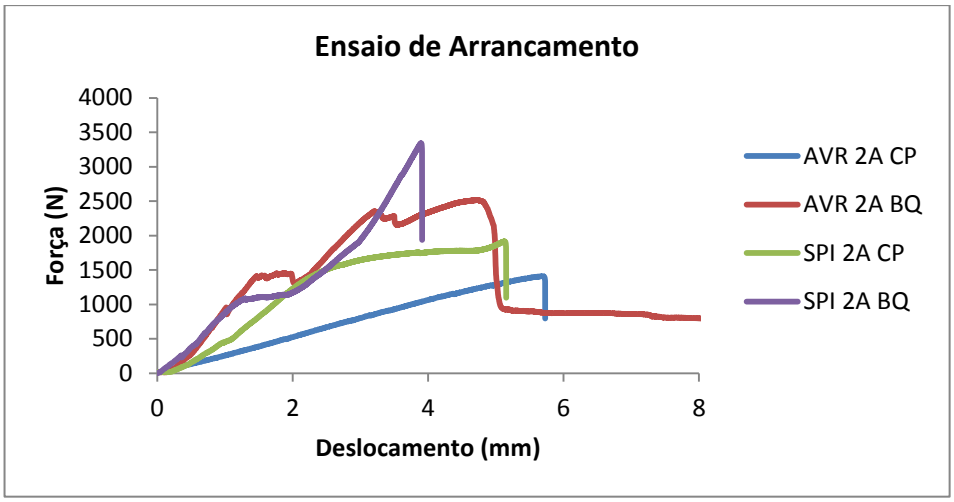


Figura 38. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI 2A com CP e BQ.

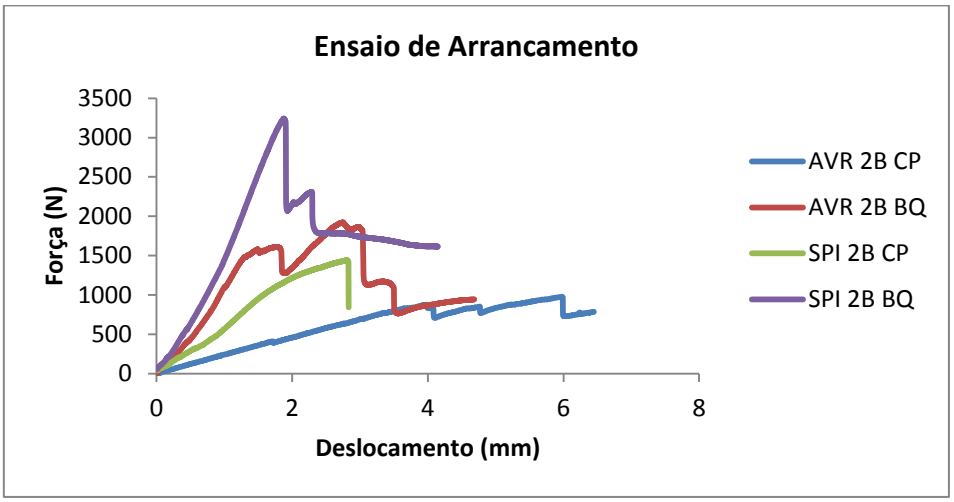


Figura 39. Gráfico força – extensão resultante do ensaio referente ao AVR e SPI 2B com CP e BQ.

É de realçar que em todos os ensaios realizados, os provetes de AVR BQ apresentaram maior resistência ao arrancamento que o caso do SPI CP. Ou seja, mesmo o granito com resistência à flexão, tracção e módulo de Young inferiores, teve capacidade de obter um melhor desempenho ao arrancamento quando o contacto foi realizado pela BQ.

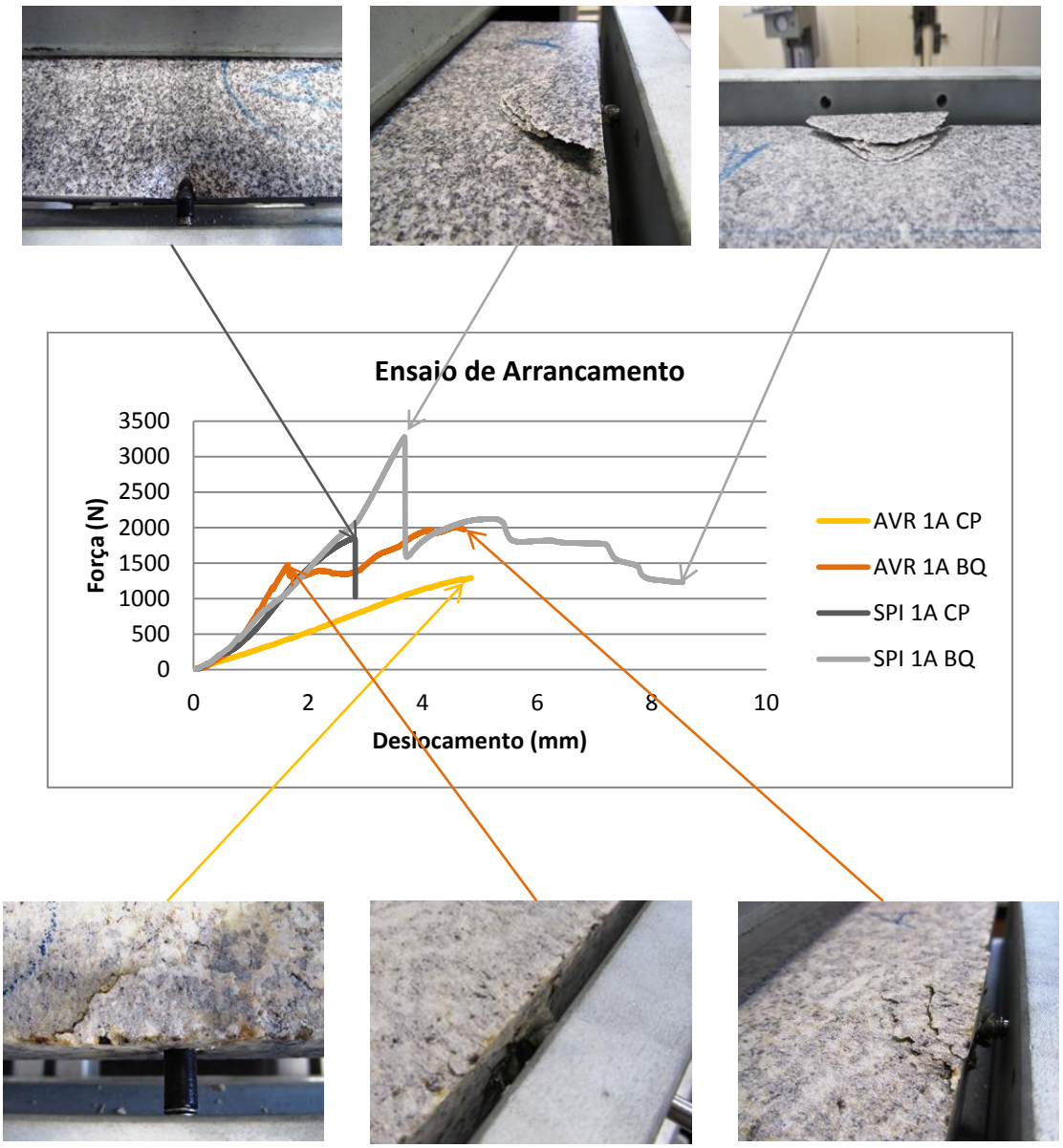


Figura 40. Conjunto representativo do ensaio de arrancamento em gráfico F-extensão, acompanhado de fotos que ilustram alguns troços de comportamento dos granitos com aplicação da CP e BQ.

A Fig.40 ilustra troços presentes no ensaio de arrancamento efectuados. Nota-se que para o uso da BQ a curva força-extensão passa por várias fases até ocorrer a rotura do granito. No entanto para o uso da CP esta situação já não ocorre.

5.2. Simulações Numéricas

Após os ensaios experimentais de resistência ao arrancamento dos provetes de pedra natural, efectuou-se a simulação numérica no *software* ANSYS®, para sua avaliação.

As simulações foram realizadas segundo o modelo linear elástico a uma força constante (F_y = 2000 [N]), para comparar-se os valores obtidos da deformação na direcção do eixo Y (EPY) obtidos nas zonas de contacto para os diferentes modos de contacto (CP e BQ). As Figs. 41 e 42 ilustram a deformação ao longo do eixo Y para os granitos simulados (AVR e SPI).

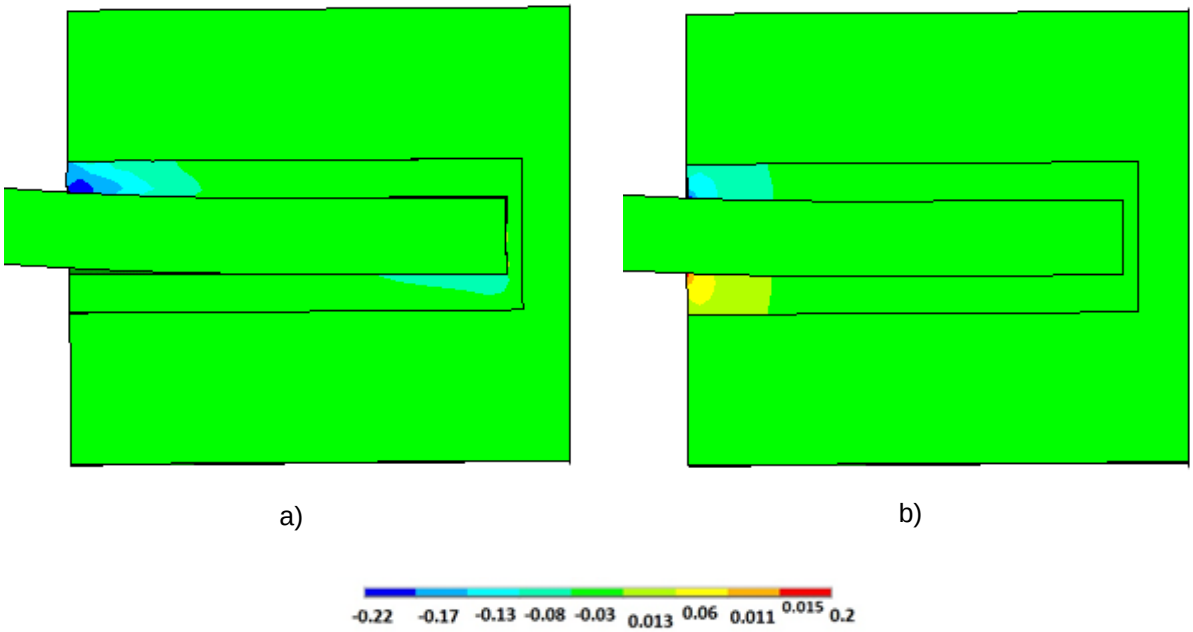


Figura 41. Deformação ao longo do eixo Y para o AVR: a) CP; b) BQ.

Pela distribuição da deformação nas áreas próximas ao sistema de fixação indirecta, verifica-se que vão de acordo com o modo de contacto ocorrido nos ensaios de arrancamento.

Os valores observados na legenda de escala das Figs. 41 e 42 indicam que: para valores negativos os estados de tensão à compressão estão presentes; e para valores positivos os estados de tracção-

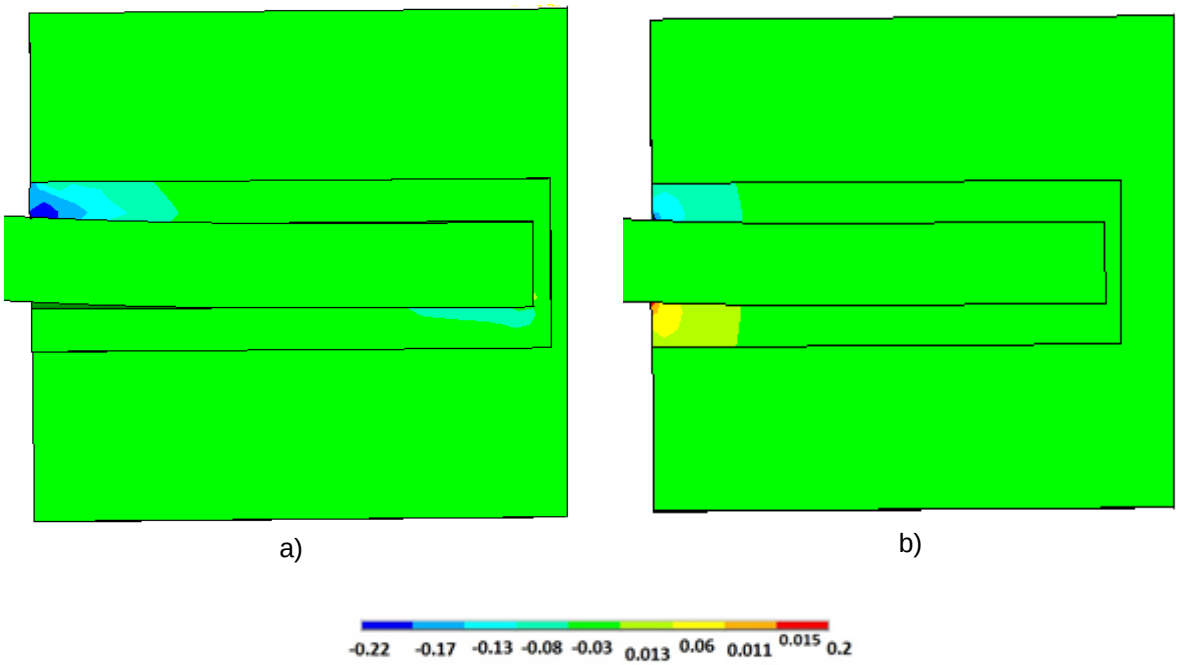


Figura 42. Deformação ao longo do eixo Y para o SPI: a) CP; b) BQ.

Comparando as simulações numéricas para os granitos e seus modos de contacto (CP e BQ) ao nível da deformação, verifica-se que quando se aplica a BQ aos granitos a sua intensidade é menor da ocorrida para a CP. Isto significa uma maior intensidade de rigidez do sistema quando comparado com a utilização da CP. Deste modo é plausível descrever a rigidez do ensaio de arrancamento do sistema de fixação indirecta para ambos os modos de contacto.

A Tab.12 reporta os valores nodais das simulações referentes às linhas horizontais da Fig.43 para melhor percepção dos valores reais da deformação e seus estados (compressão, tracção) (Fig.45).

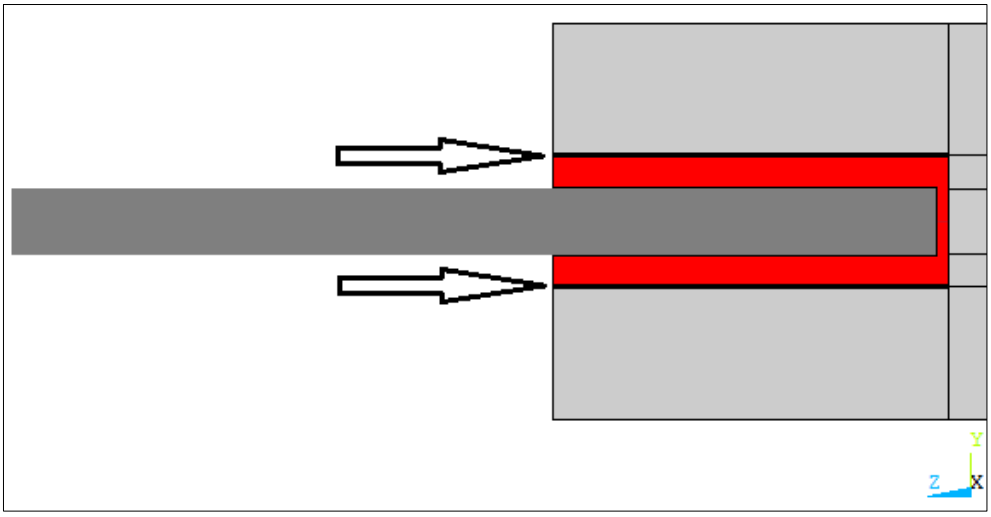


Figura 43. Linhas horizontais escolhidas para análise dos valores da Deformação em Y.

Tabela 12. Resultados nodais da deformação em Y nas linhas horizontais assinaladas na Fig.43

Granito		AVR		SPI	
Modo de fixação		CP	BQ	CP	BQ
Deformação em Y (%) por material	*Pedra*	-0.132	-0.025	-0.048	-0.009
	CP/BQ	-1.822	-0.569	-1.789	-0.550
	CP/BQ	-0.858	0.563	-0.825	0.550
	Pedra	-0.040	0.024	-0.015	0.009

Analisando os resultados da Tab.12 obtidos pela simulação numérica ao aplicar-se uma força (F_y = 2000 N), que ao nível do granito AVR CP os valores da sua deformação são superiores (-0.132%) aos obtidos pela BQ (-0.025%), tanto para a pedra e CP/BQ. O mesmo ocorre para o caso do granito SPI (CP=-0.048% ─ BQ=-0.009%).

Como se assumiu o modelo linear elástico para a análise (MEF) a força constante, o sistema com a utilização da CP apresenta-se com deformação superior na pedra.

A aplicação da força de 2000 N encontra-se num intervalo de valores obtidos nos ensaios de arrancamento relativamente às forças de rotura máximas. Referente ao granito AVR CP que atingiu 1202 N e 2382 N a diferença dos valores na deformação em Y pode estar implícita, visto ser uma análise linear elástico.

A verificação dos estados de compressão e tracção para os diferentes tipos de fixação (contacto) aplicados para as análises pelo MEF foi comparada com o experimental para o granito AVR.

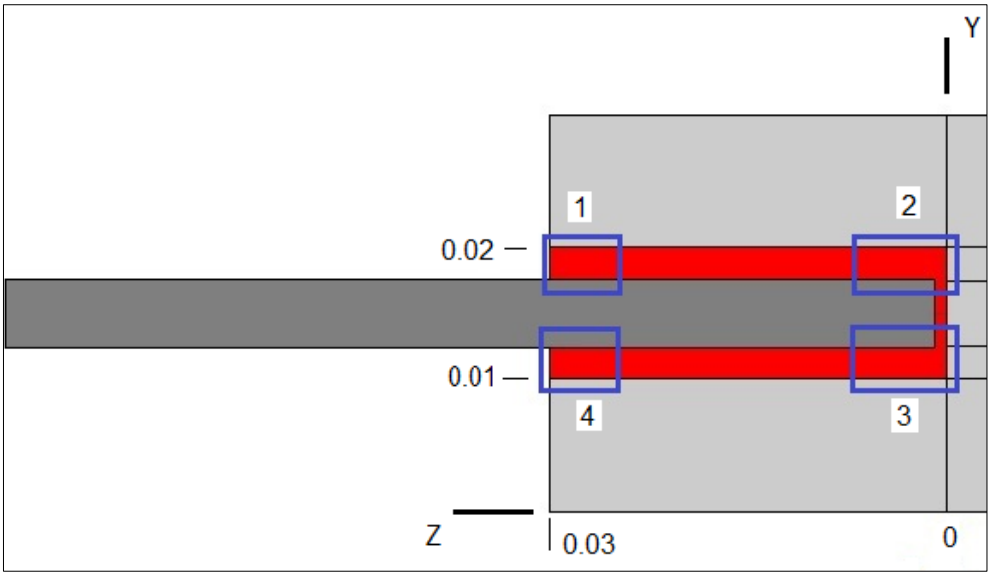


Figura 44. Zonas escolhidas para análise do estado.

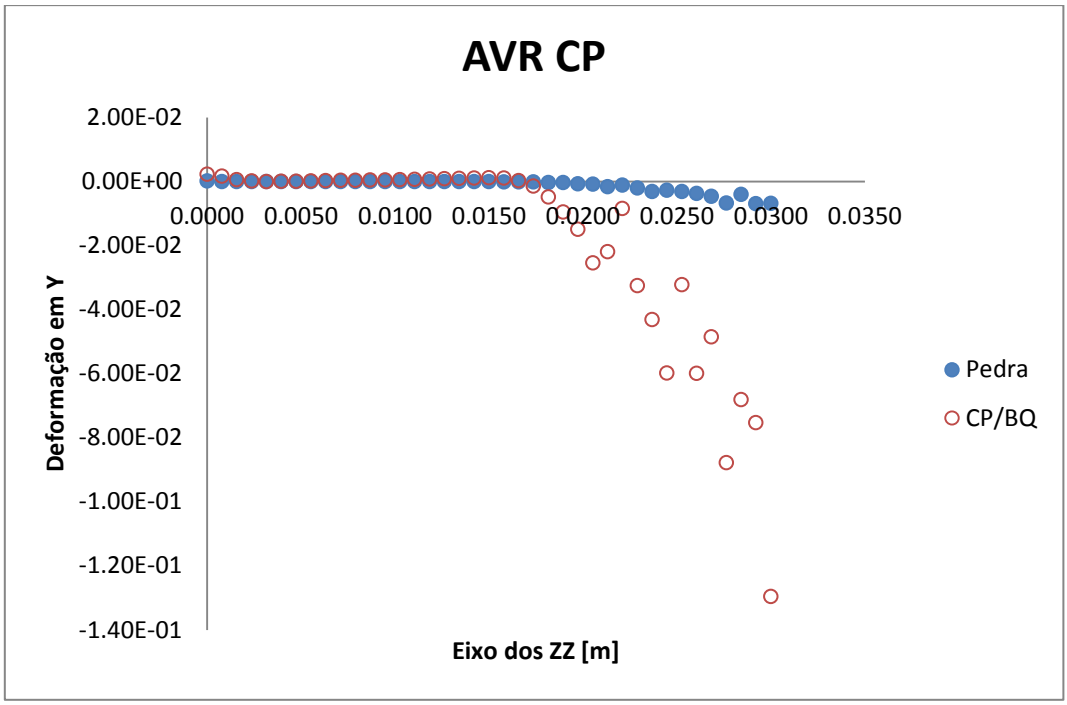


Figura 45. Gráfico AVR CP referente à Linha Horizontal Superior da Fig. 43.

Ao utilizar-se a CP no sistema de fixação indirecta e observando os valores da deformação em Y da linha horizontal superior (Fig.43), e relacionando com a Fig.44 às zonas 1 e 2.

Espera-se valores nulos de deformação na zona 2, devido ao facto de não estar a haver ligação entre os materiais, pela Fig.45 este facto confirma-se. Ao seguir-se o eixo dos Z até à extremidade (Z=0.03m) zona 1, a deformação do material deve possuir valores negativos significativos do estado de compressão,

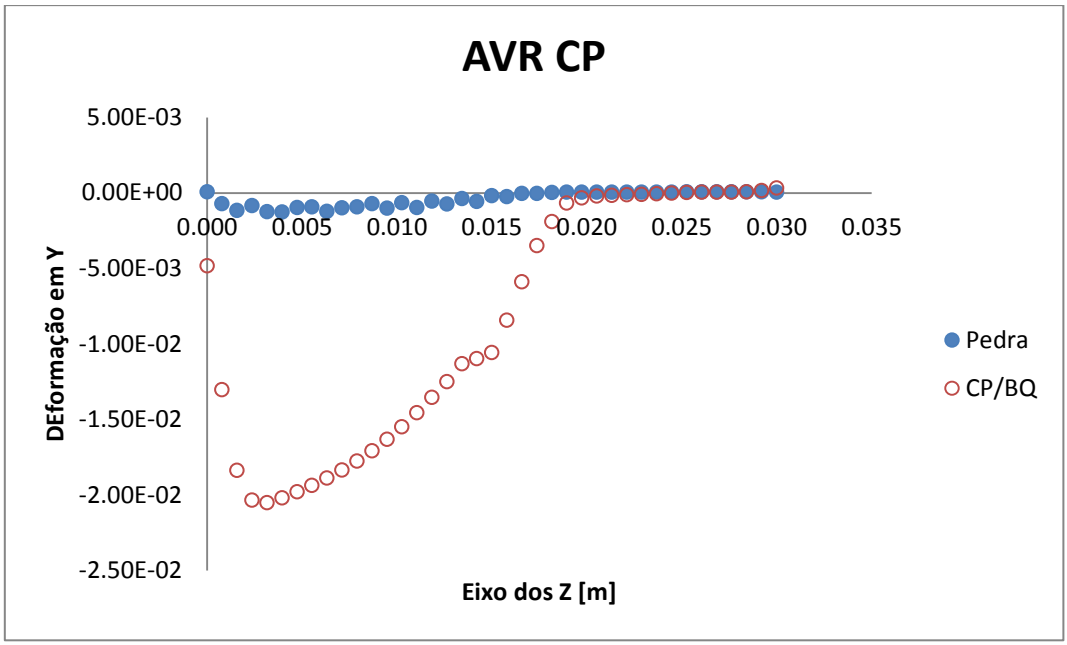


Figura 46. Gráfico AVR CP referente à Linha Horizontal Inferior da Fig. 43.

Às zonas 3 e 4 (Fig.44) verifica-se uma deformação de valores negativos na zona 3 (Fig.44) significando um estado de compressão, e na zona 4 valores nulos por não haver ligação da CP com o granito. Observando a Fig.46 esta situação ocorre.

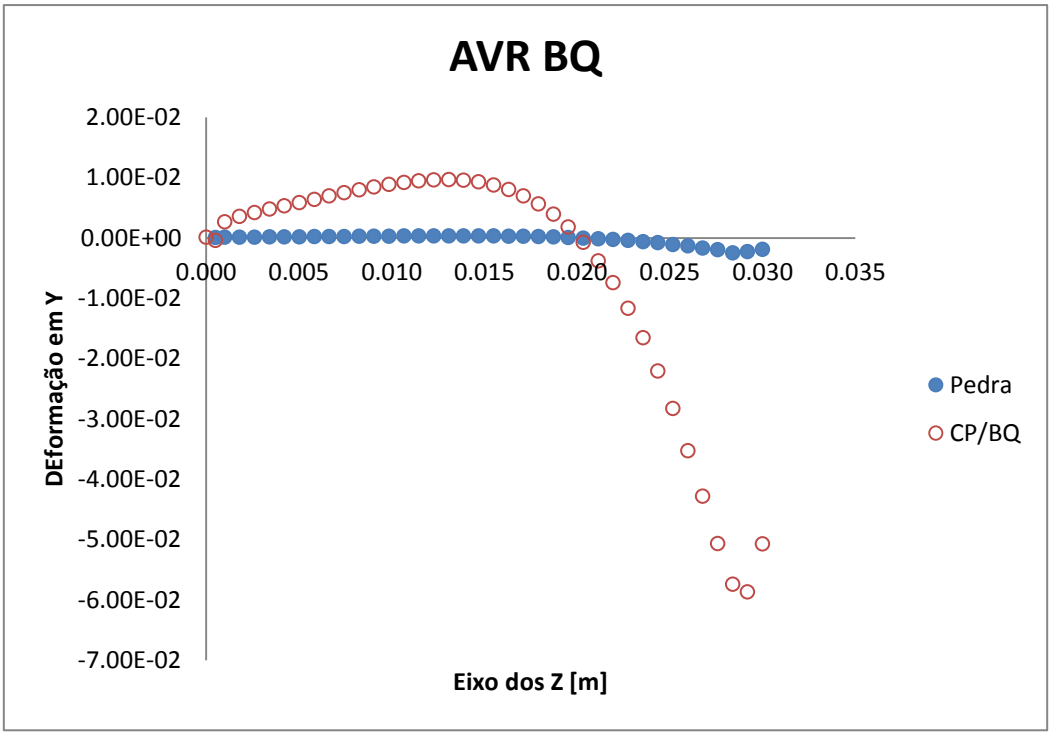


Figura 47. Gráfico AVR BQ referente à Linha Horizontal Superior da Fig. 43.

Ao utilizar-se a BQ no sistema, o efeito “colado” é logo assumido, assim a reacção de estados é diferente. Nas zonas 2 e 4 (Fig.44) espera-se valores de deformação positivos representativos de um estado de tracção. Observando-os as Figs. 47 e 48 pode-se constatar..

Em relação às zonas 1 e 3, valores negativos de deformação em Y são esperados. Observando-se as Figs. 47 e 48 confirma-se o estado de compressão.

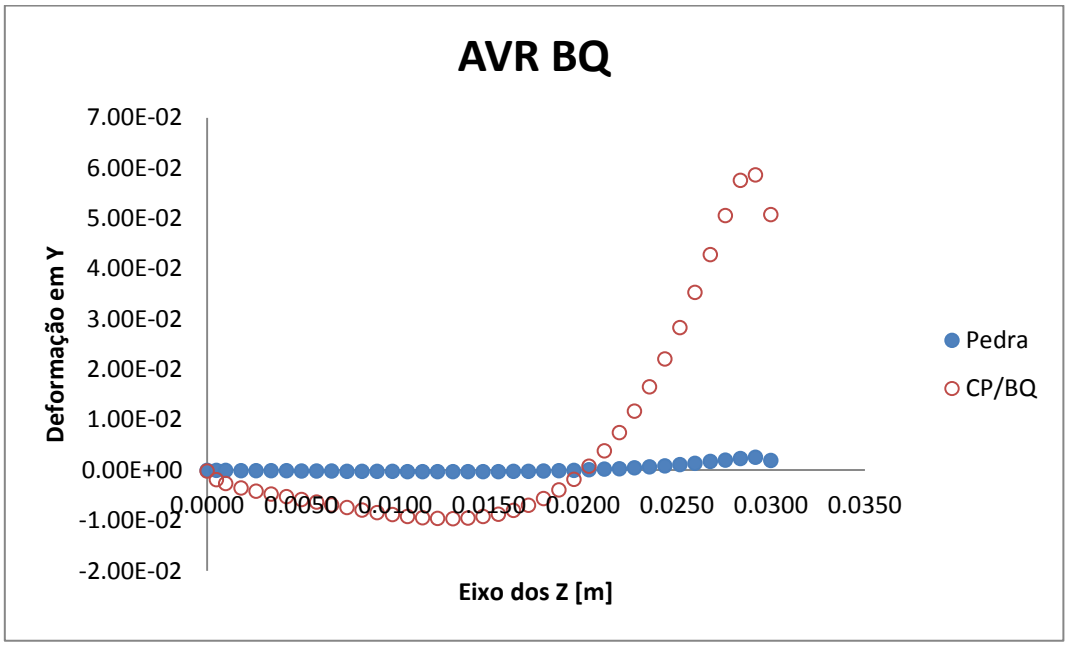


Figura 48. Gráfico AVR BQ referente à Linha Horizontal Inferior da Fig. 43.

A analise enunciada anteriormente também se verificou no granito SPI CP e BQ.

As Figs.49 e 50 representam a deformada resultante da simulação numérica para o AVR CP. Para observar-se as imagens deste modo, necessitou-se de utilizar o *auto scale* no programa, assim verifica-se, que a cavilha de aço apresenta uma deformação aproximada ao observado no ensaio experimental de arrancamento. A cavilha tenta penetrar na zona da camisa e depois na pedra, situação que na realidade só acontece no instante antes da rotura pela parte da pedra natural. Também se visualiza a situação de os elementos não estarem “colados” quando se aplica a CP (Fig.49) em comparação com o que ocorre na BQ (Fig.50).

O mesmo se verifica ao analisarmos as Figs.51 e 52 para o granito SPI.

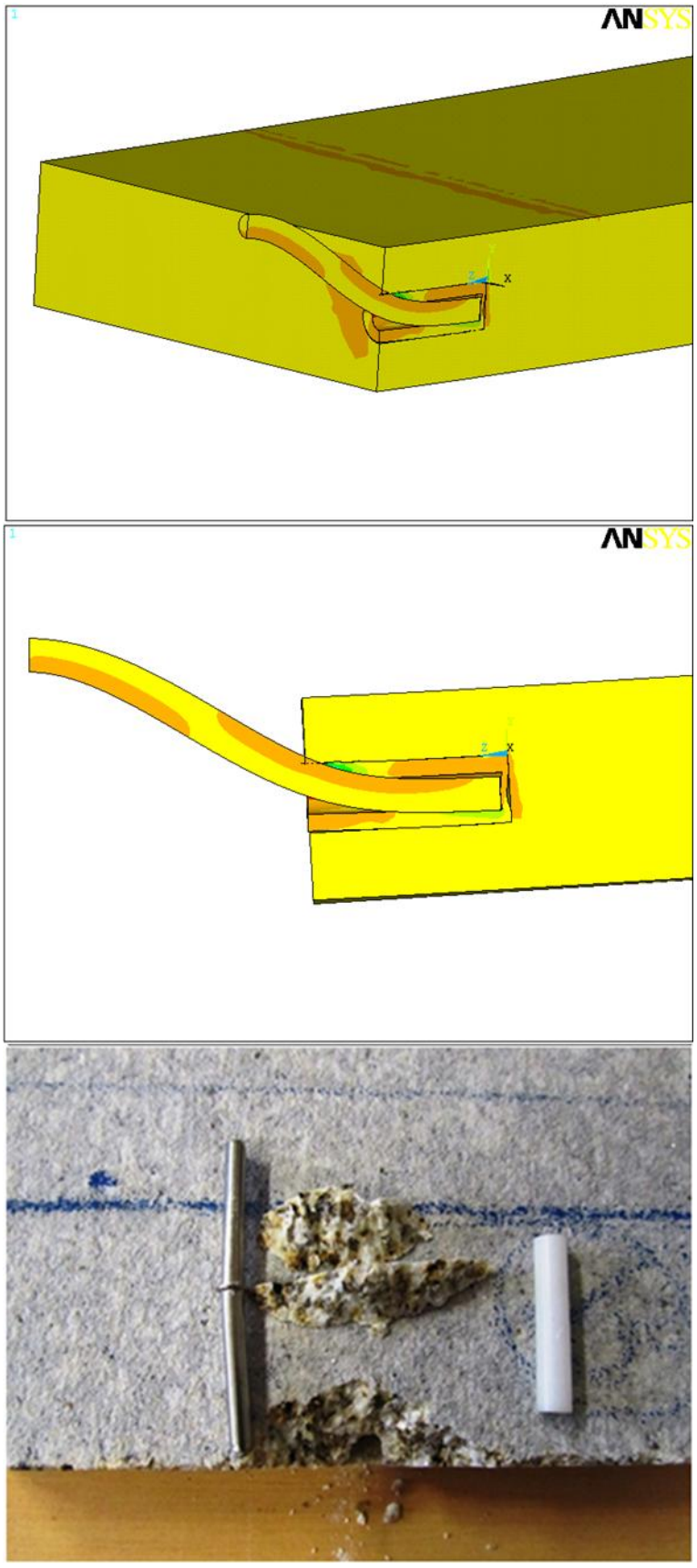


Figura 49. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o AVR CP.

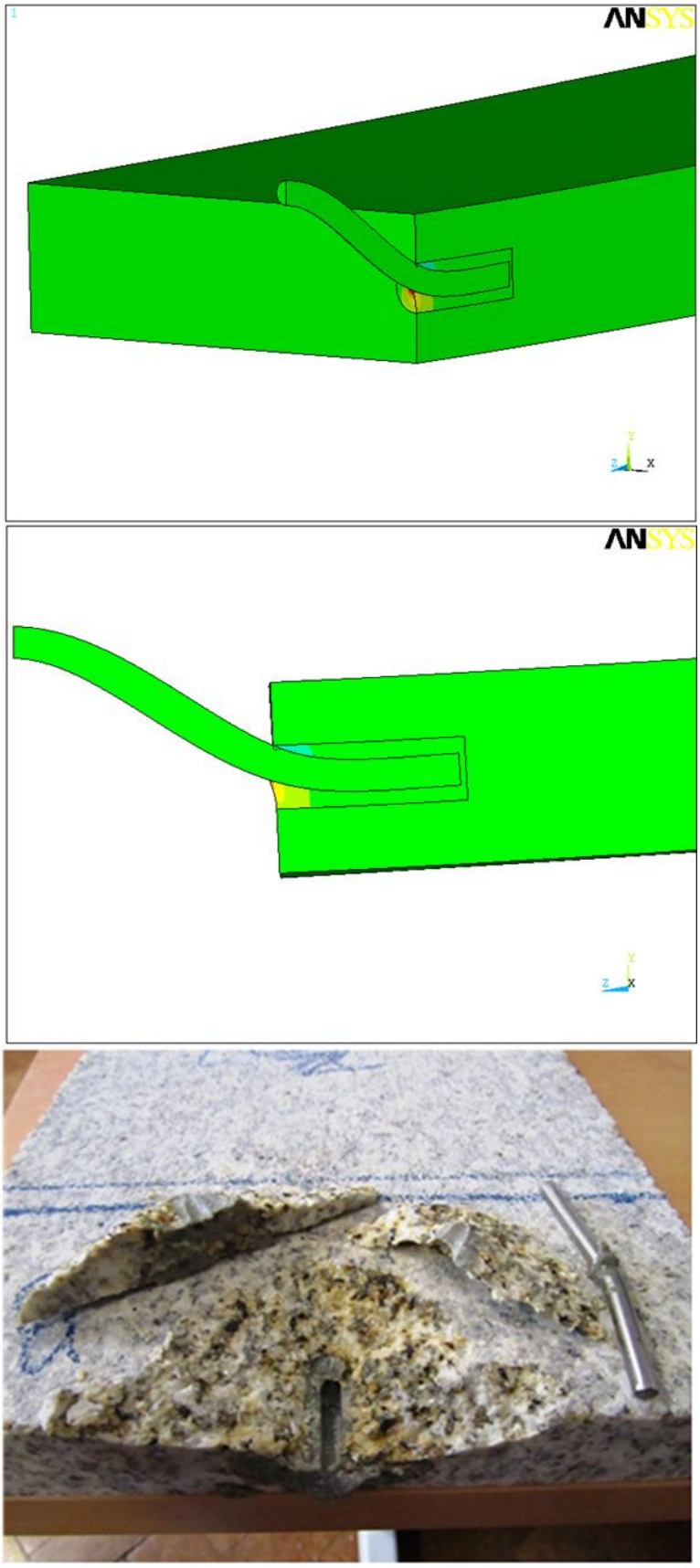


Figura 50. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o AVR BQ.

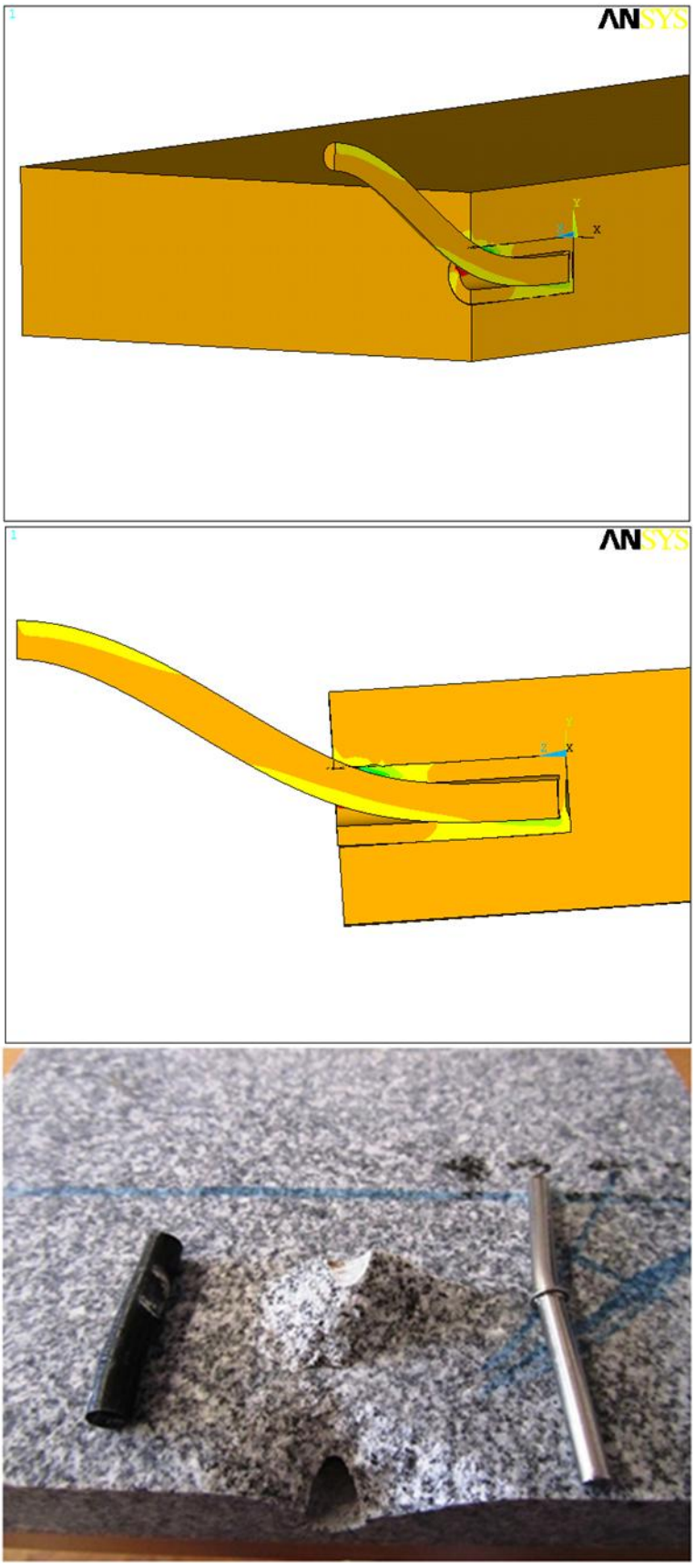


Figura 51. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o SPI CP.

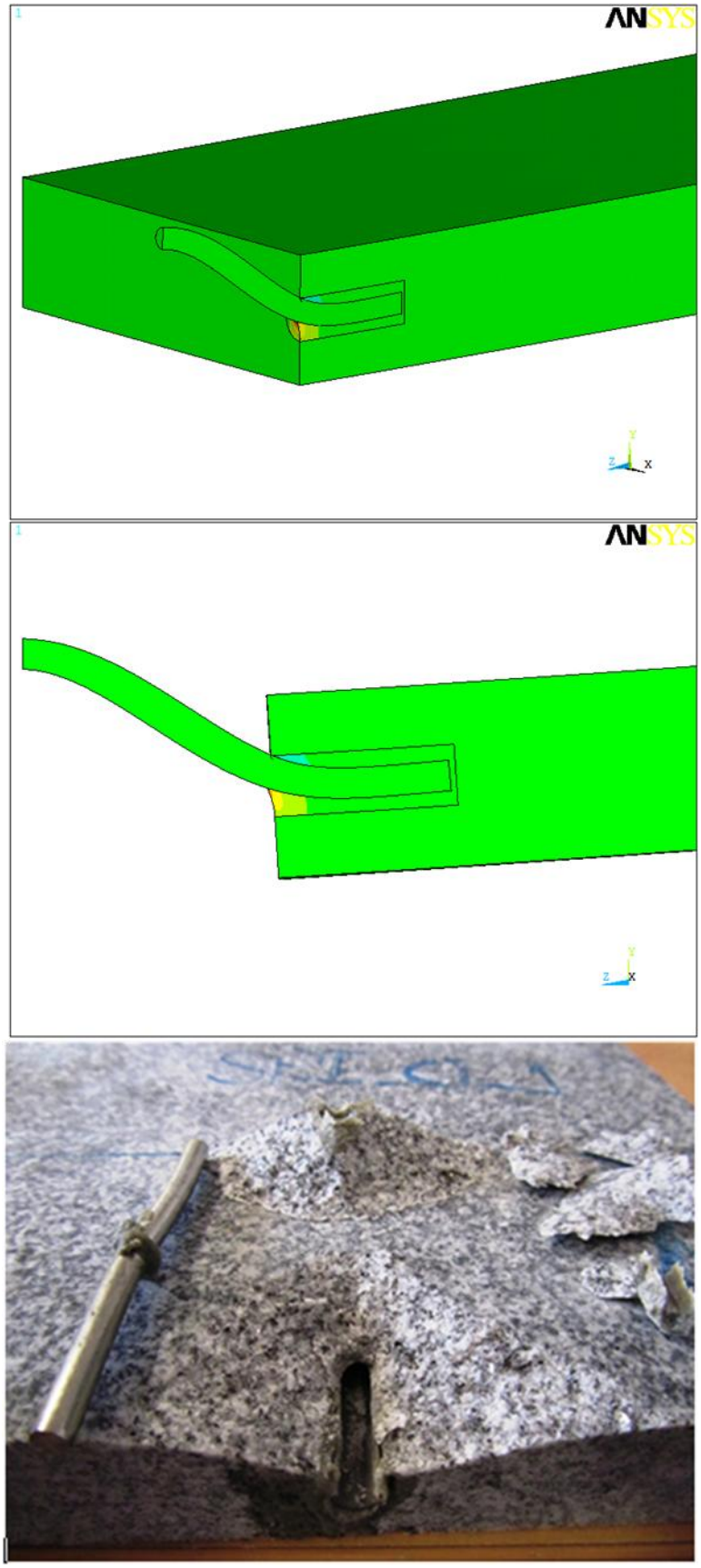


Figura 52. Ampliação da deformada obtida no ANSYS®, e a resultante do ensaio experimental para o SPI BQ.

6. Conclusões

O desenvolvimento e inovação das técnicas de construção dos edifícios originaram evoluções do mesmo modo no revestimento das fachadas a pedra natural. O aparecimento de novos sistemas de fixação directa e indirecta de placas de pedra natural, leva a indústria da construção a necessitar de conhecer as características dos materiais envolvidos em ambos os sistemas de fixação

O desafio deste trabalho teve como base a validação experimental das simulações numéricas dos ensaios de arrancamento no ponto de fixação à escala real. Neste campo escolheu-se o *software* ANSYS® para modelar e simular os ensaios de arrancamento.

Esta dissertação baseou-se em trabalhos já realizados anteriormente para conhecimento das características e comportamento mecânico das pedras naturais, como ensaios de resistência à flexão a carga centrada, ensaios de resistência à flexão a momento constante e ensaios de resistência à flexão para estimativa à tracção, análises à absorção de água a pressão atmosférica, densidade e porosidade aberta e cálculo do módulo de Young.

Para o sistema de fixação das pedras naturais às fachadas, escolheu-se o sistema indirecto do tipo furo (*hole*) com broca cilíndrica para inserção de cavilha de aço. Para a ligação entre a cavilha de aço e a pedra natural, estudaram-se dois modos de contacto: a camisa polimérica (CP) e a bucha química (BQ).

O granito foi seleccionado face a outras tipologias de pedra natural por ser largamente aplicado na construção pelas suas características de durabilidade e elevada resistência mecânica. Os granitos escolhidos para estudo foram o Amarelo de Vila Real (AVR) e o Cinzento de Alpalhão (SPI).

O desafio desta dissertação foi o desenvolvimento de um modelo em Elementos Finitos capaz de prever o comportamento mecânico dos elementos escolhidos.

Comparando-se os valores obtidos para a resistência à flexão nos três métodos, verificou-se que o granito SPI atingiu sempre valores superiores (mais que o dobro) que o granito AVR (Tab.8). Situação que se pode explicar pelas características da microestrutura das pedras (Tab.7) onde o AVR apresenta maior porosidade que o SPI. Outra razão está ligada ao módulo de Young de cada granito, o SPI (38,8 ± 1,95 GPa) possui mais que o dobro que o AVR (14,1 ± 1,01 GPa).

Ilustrou-se pelas Figs. 33 e 34 que o granito se comporta como um material frágil.

Analisando-se os ensaios de arrancamento efectuados, verifica-se que quando se aplica a CP ao sistema de fixação, ambos os granitos atingiram valores menores de força de rotura (Tab.9) quando comparados com a utilização da BQ (Tab.10).

Uma das razões para a diferença dos valores pode estar no modo que a CP e a BQ se ligam à cavilha de aço e à pedra natural. Ao aplicar-se a CP verifica-se que o furo na pedra não fica totalmente preenchido pela CP havendo uma ligeira folga na ligação da cavilha-camisa-pedra. É

possível que esta situação faça com que a distribuição da força no ensaio esteja mais localizada em certas zonas da CP e no furo.

Ao invés, quando se aplica a BQ fica-se com um sistema “colado” visto que não há liberdade de movimento entre a cavilha de aço e a pedra, distribuindo uniformemente a força do ensaio pela cavilha de aço e furo. Tal explica os valores inferiores atingidos nos ângulos de rotura.

Comparando-se a rigidez do sistema (R) (Tab.11), verifica-se que a aplicação da CP nos granitos realça diferenças, 357 N/mm no AVR e 777 N/mm no SPI, salientando a diferença dos granitos no módulo de Young (AVR com 14,05 GPa; e SPI com 38,77 GPa). No caso da BQ tal situação não ocorre pois embora o SPI apresente valor superior (1242 N/mm), o AVR é da mesma ordem de grandeza (1118 N/mm). Isto mostra que o sistema não está a dar a devida importância ao módulo de Young dos granitos.

Esta hipótese pode estar relacionada com a situação do contacto existente no furo efectuado na pedra, BQ “colada” e CP com alguma liberdade de movimento no furo. Ao aplicar-se uma força, neste tipo de contacto (BQ), espera-se que origine um estado de tensões de compressão e tracção, enquanto a CP irá originar estados de tensão de compressão.

Ao criar-se o modelo para a análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) teve-se em atenção a situação da condição da CP e BQ em relação ao contacto com a cavilha de aço e a pedra natural.

Assim na construção do modelo (Fig.19) para a análise com CP foi pensada em nível de contacto, criando volumes independentes para representar os diferentes materiais e encaixa-los introduzindo apenas um coeficiente de atrito (Tab.6) entre os materiais.

No caso da BQ e seu comportamento “colado”, procedeu-se da mesma forma que a CP, mas utilizou-se a ferramenta *merge* para “colar” os volumes, deste modo o modelo BQ comporta-se como um só sólido composto por três materiais diferentes.

Aos dados inseridos no *software* (Tab.5) efectuou-se apenas uma análise linear elástica a uma força constante (F_y= 2000 N). Analisaram-se depois os resultados referentes à deformação em Y ocorrida para os diferentes casos.

Comparando-se os valores de deformação (Tab.12) para o granito AVR CP são superiores (-0.132%) aos obtidos pela BQ (-0.025%), o mesmo ocorre para o caso do granito SPI CP (-0.048%) e BQ (-0.009%). Deste modo, a utilização da CP apresenta-se com deformação superior na pedra.

A aplicação da força de 2000 N encontra-se num intervalo de valores obtidos nos ensaios de arrancamento relativamente às forças de rotura máximas. Referente ao granito AVR, que atingiu 1202 N (CP) e 2383 N (BQ), a diferença dos valores na deformação em Y pode estar implícita, visto ser uma análise linear elástica.

Verifica-se pela distribuição da deformação nas áreas próximas ao sistema de fixação indirecta que estão de acordo com o modo de contacto ocorrido nos ensaios de arrancamento.

Na aplicação da BQ aos granitos, verifica-se que a intensidade da deformação é menor do que quando se aplica a CP. Significando uma maior intensidade de rigidez quando comparado com a CP.

Os estados de tensão à compressão e tracção para a CP e BQ foram comprovados através da análise dos gráficos presentes nas Figs. 43 a 48, onde se mostrou que estão de acordo com o previsto no ensaio de arrancamento.

A avaliação dos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos nos granitos AVR e SPI com aplicação da CP e BQ, indica que o modelo proposto pode vir a ser utilizado como ferramenta complementar, em investigação de revestimentos com materiais pétreos.

Assim aplicando apenas as propriedades dos materiais medidos e aproximando os parâmetros de contacto entre os materiais do sistema de fixação indirecta com o que de real acontece, o MEF não compromete os seus valores quando comparados com os de um ensaio de arrancamento efectuado para os mesmos materiais.

7. Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se um estudo mais abrangente ao nível das pedras naturais, comparando uma rocha ígnea com uma rocha metamórfica.

Ao nível dos modos de ligação camisa polimérica e bucha química, estudar outros materiais para aplicação no sistema de fixação indirecta.

Realizar uma análise de contacto tendo em conta outros caminhos e soluções para a análise de contacto entre os materiais, inclusive uma análise não linear.

A escolha de um outro tipo de fixação indirecta é também proposto como trabalho futuro, por exemplo a fixação pelo método de ranhura (kerf) é também muito utilizada neste tipo de revestimento, e efectuar a sua modelação numérica.

8. Referências Bibliográficas

[1] Costa, Manuel Prata Ribeiro – Manual de Controlo de Qualidade para Revestimentos de Fachadas em Pedra – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST 2011.

[2] Pires, Vera Cordeiro – Estudo e optimização do sistema de fixação indirecta perno-cavilha, para placas de calcário Moleanos – Projecto Integrado por Computador, IST, Fevereiro 2009.

[3] Gerns, Edward A. – Design issues for Thin-Stone Cladding Systems – RCI Symposium of Building Envelope Technology, November, 2002.

[4] Brito, Mariana Couto – Reabilitação de Fachadas e o seu Contributo Energético – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Arquitectura, IST, Outubro 2010.

[5] Dutra, Miguel Resendes – Caracterização de Revestimentos em Fachadas Ventiladas – Análise do Comportamento – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST Março 2010.

[6] Pinheiro, M.D. – Ambiente e Construção Sustentável – Instituto do Ambiente, Amadora 2006.

[7] Camposinhos, Rui – Revestimentos de Pedra Natural com Fixação Mecânica – Dimensionamento e Projecto – Edições Sílabo, Lisboa 2009.

[8] Antunes, Marta; Rosenbom, Kim; Garcia, J. – Anomalias na Colagem de Pedras Naturais – 1º Congresso Nacional de Argamassas, Novembro de 2005.

[9] Weber – O Guia Weber, 2010.

[10] Hesselbarth, Frank; Rosenbom, Kim; Garcia, João; Antunes, Marta – Pedra Natural – Um Material Único. Artigo publicado para o grupo Maxit Portugal.

[11] Stazi, F.; Tomassoni F.; Vegliò A.; Di Perna C. - Experimental evaluation of ventilated walls with an external clay cladding - Renewable Energy, Vol. 36, 2011.

[12] Ciampi, M.; Leccese, F.; Tuoni, G. - Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings - Solar Energy, Vol. 75, 2003.

[13] Mora, Perez M.; Lopez, Patino G.; Bengochea, Escribano M. A.; et al. - Quantification of ventilated facade efficiency by using computational fluid mechanics techniques - Boletin de la sociedad Espanola de cerámica y vidrio, Vol. 50, 2011.

[14] Moreiras, Sérgio Trajano Franco; Paraguassú, Antenor Braga; Ribeiro, Rogério Pinto – Dimension stone for building façades – methodology for structural design, Published online, Springer-Verlag 20 July 2007.

[15] Camposinhos, R. S. Amaral, P. M.; Guerra Rosa, L.; Pires, Vera – Dimension stone cladding design – Dowel Anchorage Design, paper presented at Int. Congress of Dimension Stones (2008), Carrara, Italy, 29th – 31st May, p. 203-207.

[16] Wong Wan Sie, Winxie – Analysis and Design of Curtain Wall Systems for High Rise Building – A dissertation towards the degree of Bachelor of Civil Engineering, University of Southern Queensland, November 2007.

[17] Saraiva, Ana Gabriela; Bauer, Elton; Bezerra, Luciano Mendes – Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica, Porto Alegre, Setembro de 2001.

[18] Oliveira, E. J. – Biomecânica básica para ortodontistas. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

[19] Gallagher, R. H. Introduction. Finite element analysis: fundamentals. 4ª ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.

[20] Lotti, Raquel S. Machado, André W.; Mazzieiro, Ênio T. Júnior, Janes L. – Aplicabilidade cientifica do método dos elementos finitos, Maringá, Brasil, v. 11, n. 2, p. 35-43, Abril de 2006.

[21] Azevedo, A. F. M. – Método dos Elementos Finitos, 1ª ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Abril de 2003.

[22] Vicente, W. M. – Análise de Tensões em Placas Circulares Utilizando Elementos Finitos Axissimétricos – Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil, Fevereiro de 2009.

[23] Kachlakev, D.; Miller, T.; Yim, S.; Chansawat, K.; Potisuk, T. – Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates – Final Report, Oregon Department of Transportation Research Group, May 2001.

[24] Uchôa, J. C. B. – Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistemas de Revestimento – Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas e Construção Civil, Brasília, Abril de 2007.

[25] Camposinhos, R. S.; Camposinhos, R. P. A. – Dimension stone cladding design with dowel Anchorage. Construction Materials - Thomas Thelford Journals, Vol. 162 (2009), p. 93-138 2009.

[26] Guerra Martins, J.; Zeferino, A. – Materiais de Construção I – Rochas Naturais, Série Materiais, 4ª ed. 2010.

[27] Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação, I.P. – Rochas Ornamentais Portuguesas – disponível na internet em http://rop.ineti.pt/rop/FormTipo.php consulta realizada em Julho de 2011.

[28] Laboratório Nacional de Energia e Geologia – ORNABASE – Base de Dados do Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas – disponível na internet em http://e-geo.ineti.pt/bds/ornabase/Default.aspx consulta realizada em Julho de 2011.

[29] DAPCO – Fixadores Inoxidáveis disponível na internet em http://www.dapco.com.br/ consulta realizada em Julho de 2011.

[30] Camposinhos, Rui – Revestimento de Fachadas em Pedra Natural – Métodos e Técnicas de Construção I, Instituto Superior de Engenharia do Porto, V2.1, Porto, Novembro de 2005.

[31] Pattex TQ500 – Henkel – Catálogo Geral, 2009/2010.

[32] Pinto, A.C.R. Alho, A.A. Moura, A.C.; Henriques, A.E. Carvalho, C. Ramos, J.; Almeida, N. Mestre, V. – Manual da Pedra Natural para Arquitectura, DGGE, 2006.

[33] EN 13161:2008 – Natural stone test methods – Determination of flexural strength under constant moment.

[34] Pires, Vera L. C. – Produtos de Pedra Natural para a Construção – Caracterização Físico-Mecânica – Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Materiais, Setembro de 2007.

[35] Menegazzo, A.P.M. Paschoal, J.O.A. Andrade, A.M.; Carvalho, J.C.; Gouvêa, D. – Avaliação da Resistência Mecânica e Módulo de Weibull de Produtos Tipo Grês Porcelanato e Granito, Cerâmica Industrial, Brasil Fevereiro de 2002.

[36] Marques, Ana F.S. – Estudo do Comportamento Elástico de Macrocompósitos de Origem Pétrea (betões) – Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia dos Materiais, IST, Novembro de 2007.

[37] Amaral, P.M.; Fernandes, J.C.; Guerra Rosa, L. – Weibull statistical analysis of granite bending strength, IST, Published online, Springer-Verlag, Novembro de 2007.

[38] NP EN 13755:2005 – Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da absorção de água à pressão atmosférica.

[39] NP EN 1936:2005 - Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta.

[40] EN 14146:2004 – Natural stone test methods – Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance Frequency.

[41] ASTM C 1354:2004 – Natural Stone test Methods - Strength of individual Stone Anchorages in Dimension Stone.

[42] Ferreira, Fernando C. – Estudo Numérico da Propagação de Fendas em Componentes de Motores Aeronáuticos – Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, Setembro de 2008.

[43] Monteiro, Cleidy C.C. – Determinação Computacional do Factor de Intensidade de Tensões em Fendas na Vizinhança de Entalhes - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, IST, Setembro de 2007.

[44] Ottosen, N.S, Petersson, H., "*Introduction to the Finite Element Method*"; United Kingdom, Prentice Hall International (UK) Ltd; 1992.

[45] Huebner, K.H., Thornton, E.A., Byron, T.G., "*The Finite Element Method for Engineers*"; Canada, John Wiley & Sons Inc., 3rd Edition; 1995.

[46] ANSYS – ANSYS Structural Analysis Guide, ANSYS Release 9.0, ANSYS, Inc., November 2004.

[47] ANSYS – ANSYS Contact Technology Guide, ANSYS Release 12.0, ANSYS, Inc., April 2009.

[48] Čajka, Radim; Víta, Ondrej – Centre for Integrated Design of Advanced Structures – Element for Modeling of Interaction between Foundations and Bedrock in ANSYS Software – project No.1M0579, Technical University of Ostrava, December 2005.

[49] M.D. Lewis, in: Modern Stone Cladding – Design and Installation of exterior Dimension Stone Systems - ASTM MNL 21, edited by American Society for testing Materials, Philadelphia (1995), p.7-22.

Anexos

EFFECT OF DOWEL FIXING CONDITIONS ON ANCHORAGE RUPTURE LOADS AND RUPTURE ANGLES OF TWO PORTUGUESE GRANITES

V. Pires, L. G. Rosa, V. Infante, P. M. Amaral, A. Pacheco

Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, T.U.Lisbon,
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
E-mail: vera.pires@ist.utl.pt

ABSTRACT

Stone structural role on masonry walls (blocks) is being progressively replaced and nowadays most of the applications refer only to cladding (slabs). Among natural stones, granites are a major construction material all over the world. This work is based on previous studies and sets out a laboratory experiment for studying the breaking load and rupture behaviour of dowel-hole fixing systems. Two granites were tested: *Amarelo de Vila Real* (AVR) and *Cinzento de Alpalhão* (SPI), both commonly used in contemporaneous building facades, not only in Portugal but in works spread all over the world, as cladding materials and ornamental stones. Two different dowel fixing conditions were studied: one with regular plastic cap and the other with a fast curing mortar; and the differences on anchorage rupture loads and rupture angles were analysed. The results show that the different dowel fixing conditions give origin to different rupture angles and rupture loads.

KEYWORDS: Granite, Cladding, Dowel fixing, Rupture strength.

INTRODUCTION

Natural stone is considered an important and desirable cladding material. In the recent years, stone structural role on masonry walls (blocks) is being progressively replaced and nowadays most of the applications refer only to facing (slabs). By making part of the facade through indirect fixing system, the structural function of the stone is now mostly flexural instead of compressive (as it was in the blocks).

Although recent stone facades fixing possibilities seem more complex than the traditional masonry applications, they can still be simple and durable if analysed in accordance with stone characteristics and the environment.

Among natural stones, granites are a major construction material all over the world. This type of stone is not only one of the most abundant on Earth, but also one of the hardest and most durable. When selected as cladding material, granites are chosen due to the fact they are seen as very durable, uniform, sound, weather-resistant, low porosity materials with huge aesthetical options varying from dark to light tones.

Anchorage strength determined through breaking load at dowel-hole test is one of the main characteristics studied when stone is applied in a ventilated facade with a dowel-hole anchorage system.

Dowel-hole anchorage systems are especially suitable for stone slabs with maximum linear dimensions of 1 m^2 [1-4]. As shown in Fig. 1, the system is based on drilled holes at the edge of the slab for dowel (or pin) insertion.

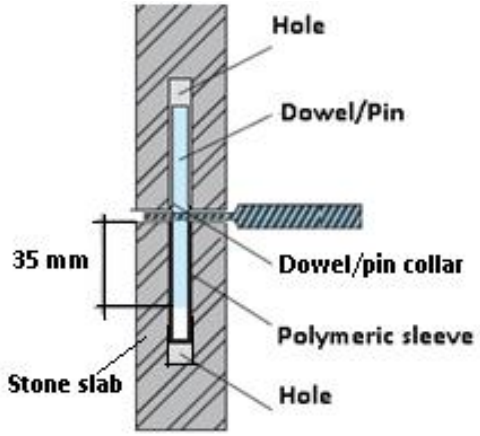


Figure 1. Schematic representation of dowel-hole anchor system, showing the main components of this system: stainless steel dowel/pin; polymeric sleeve; and hole [5].

MATERIALS AND TESTING METHODOLOGY

The present study has been conducted on specimens of two Portuguese granites: *Amarelo de Vila Real* (AVR) and *Cinzento de Alpalhão* (SPI), showing an as-sawn

surface finishing. The two granites are presented in Fig. 2.

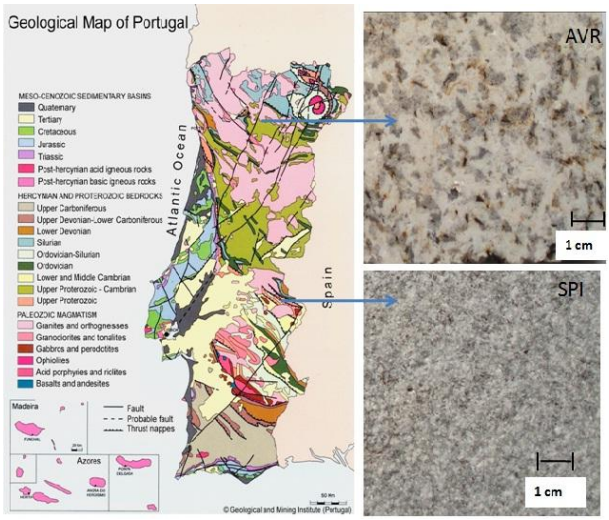


Figure 2. Geological Map of Portugal (LNEG edition) with identification of the studied granites.

Both granites are homogeneous at macroscopic scale with great application in cladding fixing systems not only in Portugal but all across Europe, Asia and America [6]. AVR granite is preferentially chosen due to its yellow colour that is associated with rustic and antique looks. On the other hand, besides its mechanical resistance, SPI granite is chosen mainly due to its sober, modern and homogeneous colour.

Granite flexural strength was determined through 4-point flexure loading configuration (constant bending moment between the two inner loading points) using specimens with length of 210 mm and cross-sectional dimensions of 30×30 mm^2. For each granite, 25 specimens were tested.

All flexural tests were carried out in an Instron 4302 machine with 10 kN load cell, at a constant crosshead displacement speed of 0.5 mm/min. The testing methodology was conducted according to EN 13161:2008 [7]; inner span = 60 mm; outer span = 180 mm.

Granites were tested for apparent density and open porosity according with EN 1936:2006 [8]. Water absorption at atmospheric pressure was determined according to EN 13755:2008 [9].

In this study a resonant frequency and damping analyser equipment was used (RFDA) to determine the Young modulus for both granites [10, 11].

The breaking load tests, for dowel-hole anchorage system, were carried out using granite slabs with dimensions 400×200×30 mm^3, containing cylindrical holes of 10 mm diameter and 30 mm depth. Tests were conducted according to the ASTM C1354-96 standard [12]. These tests were performed in an Instron 3369 machine, at a constant crosshead displacement speed of 1 mm/min.

RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Physical-mechanical characterization

Results from physical-mechanical characterization of AVR and SPI granites are presented in Table 1. Besides the mean value, standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV) are also included in Table 1.

Table 1. Physical-mechanical results for AVR and SPI granites.

Test	*Granite*	
	Amarelo Vila Real (AVR)	*Cinzento Alpalhão* (SPI)
Flexural Strength [MPa]	6.72	15.45
SD [MPa]	0.74	1.38
CV [%]	11.01	8.93
Young Modulus [GPa]	12.09	33.81
SD [GPa]	0.34	0.01
CV [%]	2.81	0.03
Apparent Density [kg/m^3]	2542	2628
SD [kg/m^3]	13	3
CV [%]	0.5	0.1
Open Porosity [%]	1.67	0.92
SD [%]	0.86	0.10
CV [%]	51.50	10.87
Water Absorption at atmospheric pressure [%]	0.66	0.35
SD [%]	0.34	0.04
CV [%]	52.52	11.43

As it was expected, results show higher flexural strength for SPI when compared with AVR, respectively 15.45 ± 1.38 and 6.72 ± 0.74 MPa. Both granite specimens show reasonably high CV's (8.93 and 11.01, for SPI and AVR respectively). Although, SPI flexural strength mean value is more than double when compared with AVR. Figure 3 represents the strength population data obtained from the 25 specimens.

The main reasons to explain this behaviour are in fair agreement with granites' microstructure. AVR presents higher open porosity (1.67 ± 0.86 %) and water absorption (0.66 ± 0.34 %) than SPI (open porosity: 0.92 ± 0.10 %; water absorption: 0.35 ± 0.04 %).

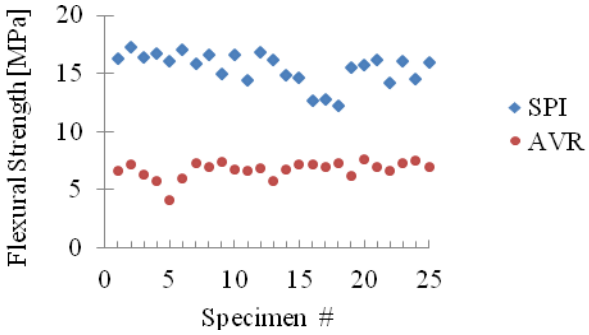
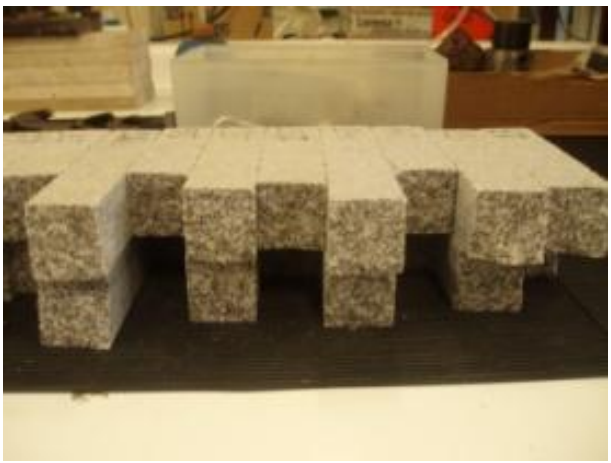


Figure 3. Flexural strength data obtained from the 25 specimens of AVR and SPI tested under 4-point bending.

A difference is also clear when comparing Young modulus for both granites. Young modulus of AVR (12.09 ± 0.34 GPa) is less than half the Young modulus for SPI (33.81 ± 0.01 GPa).

Open pores and internal fissures, among other intrinsic defects, can be responsible for lower flexural strength values in AVR. Examples of AVR and SPI fractured specimens can be observed in Figure 4 a) and b).

a)

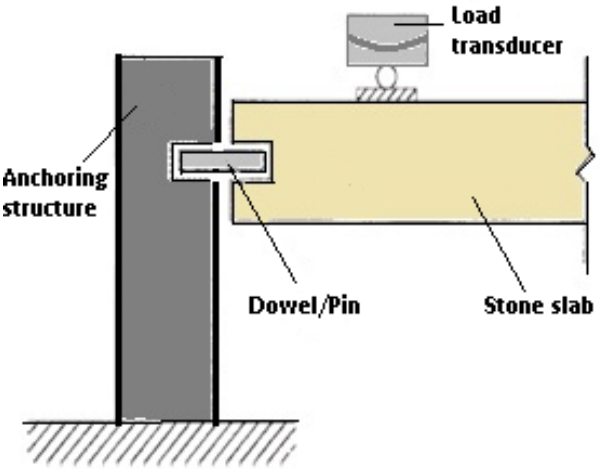


b)

Figure 4. Fractured specimens after flexural strength tests: a) AVR specimens; b) SPI specimens.

3.2. Breaking load test for dowel-hole fixing system

All granite slabs were 400×200×30 mm^3 and contained cylindrical holes of 10 mm diameter and 30 mm depth. Two different dowel fixing conditions were studied: one with regular plastic cap (PC) and the other with a fast curing mortar (FCM). The experimental setup is depicted in Figure 5 a) and b).



a)

b)

Figure 5. a) Schematic representation of the experimental set up used for the breaking load tests on the dowel-hole fixing system; b) The experimental setup in the Instron 3369 machine, with 25 kN load cell.

Tables 2 and 3 present the results of rupture load and rupture angles obtained in AVR and SPI slabs submitted to breaking load tests for dowel fixing with regular plastic cap and with fast curing mortar, respectively

Table 2. Rupture load and rupture angles for dowel fixing with regular plastic cap (PC).

Specimen #	*Rupture load* [kN]	*Rupture angle* [°]		*Rupture Area* [mm^2]	
		Right	*Left*	*Right*	*Left*
1AVR	1.38	27.1	39.6	435.9	290.2
2AVR	1.29	28.0	28.2	409.0	405.1
3AVR	1.41	21.4	35.6	565.5	327.7
4AVR	0.98	34.6	27.8	340.5	429.6
5AVR	1.02	30.2	26.5	379.2	435.7
6AVR	1.13	27.9	25.3	403.5	447.5
Mean value	**1.20**	**28.2**	**30.5**	**422.3**	**389.3**
SD	**0.18**	**4.3**	**5.7**	**77.2**	**64.8**
CV [%]	**15**	**15**	**19**	**18**	**17**
1SPI	1.85	25.9	24.1	495.0	537.3
2SPI	2.05	28.9	25.3	410.3	474.4
3SPI	1.92	34.7	25.5	356.6	499.2
4SPI	1.44	28.7	26.4	394.7	432.2
5SPI	1.56	33.9	30.5	366.4	411.6
6SPI	1.57	26.0	22.0	496.2	594.8
Mean value	**1.73**	**29.7**	**25.6**	**419.9**	**491.6**
SD	**0.24**	**3.8**	**2.8**	**61.7**	**67.9**
CV [%]	**14**	**13**	**11**	**15**	**14**

Table. 3. Rupture load and rupture angles for dowel fixing with fast curing mortar (FCM).

Specimen #	*Rupture load* [kN]	*Rupture angle* [°]		*Rupture Area* [mm^2]	
		Right	*Left*	*Right*	*Left*
1AVR	1.85	23.1	31.7	468.6	333.9
2AVR	2.67	23.8	15.5	472.8	748.8
3AVR	2.52	31.8	15.0	371.4	831.1
4AVR	1.92	20.7	23.8	581.4	500.7
5AVR	2.44	17.0	21.7	721.3	555.9
6AVR	2.74	15.8	18.1	761.8	657.8
Mean value	**2.36**	**22.0**	**21.0**	**562.9**	**604.7**
SD	**0.38**	**5.7**	**6.3**	**154.1**	**179.6**
CV [%]	**16**	**26**	**30**	**27**	**30**
1SPI	3.28	21.0	17.7	580.5	699.9
2SPI	3.43	17.2	25.0	733.1	489.6
3SPI	3.34	23.7	19.7	549.9	669.5
4SPI	3.24	23.6	26.1	551.5	493.1
5SPI	3.01	23.1	20.6	531.6	603.2
6SPI	4.13	15.8	16.1	778.8	758.7
Mean value	**3.40**	**20.7**	**20.9**	**620.9**	**619.0**
SD	**0.38**	**3.5**	**4.0**	**106.8**	**110.9**
CV [%]	**11**	**17**	**19**	**17**	**18**

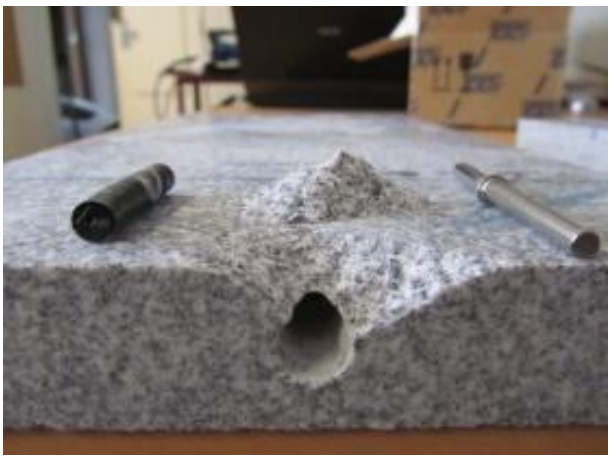
As it is possible to observe from Tables 2 and 3, in both granites rupture loads are lower when comparing dowel fixing using plastic caps *versus* dowel fixing with fast curing mortar.

AVR shows lower rupture loads with dowel fixed with plastic caps than SPI, the mean values of the rupture load are 1.20 ± 0.18 kN for AVR and 1.73 ± 0.24 kN for SPI. This seems in agreement with the difference in flexural strength that was measured by the 4-point bending tests.

In the case of dowel fixed with PC, mean values of rupture angle are similar for both granites, respectively 28.2°/30.5° (right/left) and 29.7°/25.6° (right/left). AVR and SPI mean values of rupture area are also similar, respectively 422.3/398.3 mm^2 (right/left) and 419.88/491.59 mm^2 (right/left).

Figures 7 a) and b) show examples of AVR and SPI tested specimens after breaking load at dowel hole in the case of dowel fixed with plastic cap.

a)



b)

Figure 7. Examples of tested specimens after breaking load at dowel hole in the case of dowel fixed with plastic cap: a) AVR specimen; b) SPI specimen.

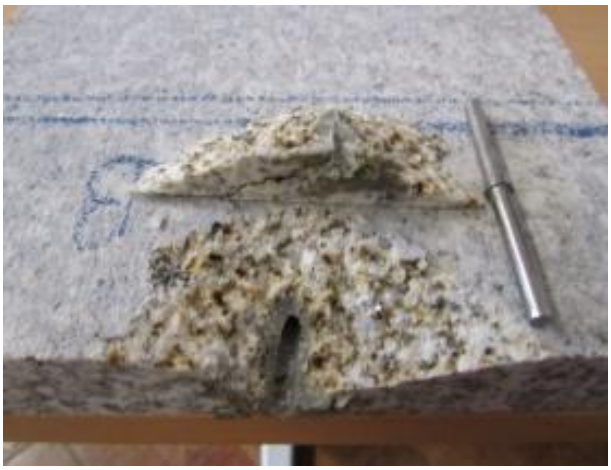
When the dowel is fixed with fast curing mortar, rupture loads increase for both granites compared to the case of dowel fixed with plastic cap. As shown in

Table 3, the mean values are 2.36 ± 0.38 kN for AVR and 3.40 ± 0.38 kN for SPI. With fast curing mortar, as in the case of dowels fixed with plastic caps, AVR presents lower rupture loads than SPI.

Rupture angles shown in Table 3 are lower than the corresponding ones presented in Table 2. For the testing conditions of Table 3 (dowel fixing with fast curing mortar) the results of rupture angle are very similar for both granites; 22.0°/21° (right/left) for AVR and 20.7° /20.9° (right/left) for SPI.

Examples of tested specimens after breaking load at dowel hole in the case of dowel fixed with fast curing mortar are depicted in Figures 8 a) and b).

Usually lower rupture angles are linked to higher rupture areas, and this was the case observed in both granites for the testing conditions of Table 3. Mean values of rupture area were: 562.9/604.7 mm^2 (right/left) for AVR and 620.9/619.0 mm^2 (right/left) for SPI.



a)

b)

Figure 8. Examples of tested specimens after breaking load at dowel hole in the case of dowel fixed with fast curing mortar: a) AVR specimen; b) SPI specimen.

Typical examples of load *vs.* stroke plots obtained in breaking load at dowel-hole tests are represented in Figure 9 for both testing conditions (plastic caps and fast curing mortar) and stone types (AVR and SPI granites).

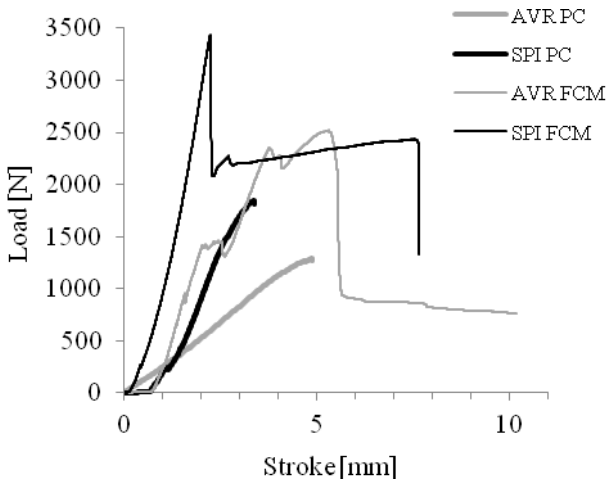


Figure 9. Example of graphs obtained in breaking load at dowel-hole tests for the two different dowel fixing conditions studied for AVR and SPI: PC – dowel/pin fixed with plastic caps; FCM – dowel/pin fixed with fast curing mortar.

From the analysis of the graphs shown in Fig. 9 we may notice that, for both granites, the PC curves are similar to the ones normally obtained from a simple flexural test. On the other hand, when fixing conditions changed to fast curing mortar (FCM) the curves reveal the occurrence of more than one rupture-path. In fact, with FCM more than one stone detachment is observed, as shown in Fig. 8 b).

As mentioned in section 2, the breaking load at dowel-hole tests were conducted according to the ASTM C1354-96 standard [12]. The scope of this standard is the determination of the ultimate load (rupture load) of the assembly consisting of stone with mechanical anchor (anchorage). The influence of the backup structure on the strength of the assemblies is not included. The standard does not aim to evaluate the differences observed on the slope of the graphs (represented in Figure 9) which can be derived from distinct fixing conditions.

When fixing a dowel with PC, there might be still space left around the hole. Contrarily, when fixing a dowel with FCM the entire hole cavity is filed with mortar that will cure and subsequently fix the dowel. The two dowel fixing systems gave origin to distinct moments of force resulting on different load *vs.* stroke graphs for PC and FCM (Figure 9).

CONCLUSIONS

Comparing rupture load results for both testing conditions (Table 2 *versus* Table 3) as well as the type of load vs. stroke graphs, it seems possible to conclude that the anchorage with PC leads to a more localised load transmission at the dowel/pin compared with the anchorage with FCM which gives a more distributed load transmission. This fact is also confirmed by lower rupture loads and higher rupture angles that are obtained with PC compared to FCM.

For dowels fixed with FCM it was possible to achieve approximately double rupture loads for both granites, in comparison to dowels fixed with PC.

Breaking load at dowel-hole tests should be one of the characteristics studied when stone is applied in a ventilated facade through a dowel-hole anchorage system. It is important that the test itself reflects the selected dowel-fixing conditions.

REFERENCES

[1] Camposinhos RS. Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Mecânica: Dimensionamento e Projecto. 1ª ed., Lisboa: Edições Sílabo, 2009, pp. 32-38.

[2] Lewis MD. Modern Stone Cladding – Design and Installation of Exterior Dimension Stone Systems. ASTM MNL 21, Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1995, pp. 7-22.

[3] Camposinhos RS, Amaral PM, Pires V. Sistemas de fixação indirecta – Revestimentos de fachada em pedra natural. Arquitectura e Vida, nº37, 2008, pp. 114-119.

[4] Pires V, Amaral PM, Rosa LG, Camposinhos RS. Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design. Construction and Building Materials 2011, 25(10):3966-3971.

[5] HALFEN Technical Product Information. Natural stone support systems – facade. FS 10.1-E (2011).

[6] Pinto JC. Estéticas da Pedra Portuguesa na Arquitectura. Revista Rochas e Equipamentos. nº99, Outubro 2010, pp. 36-49.

[7] EN 13161:2008, Natural stone test methods – Determination of flexural strength under constant moment.

[8] EN 1936:2006, Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.

[9] EN 13755:2008, Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure.

[10] Amaral PM, Rosa LG, Fernandes JC. Experimental Evaluation of Dynamic Test Methodologies for Assessing the Elastic Constants of Granitic Rocks. Journal of Nondestructive Evaluation 2005, 24(4):135-142.

[11] IMCE, Manual - RFDA System 23 - RFDA - MF, Version 6.0.2. 2001, ICME - integrated material control engineering: Belgium (2001).

[12] ASTM 1354-96, Standard Test Method for Strength of Individual Stone Anchorages in Dimension Stone.

Finite element model development for contact analysis of two different dowel fixing conditions of Portuguese granites “Cinzento de Alpalhão” and “Amarelo de Vila Real” in cladding

V. Pires[1,a], A. Pacheco[1], V. Infante[1], P.M. Amaral[1], L.G. Rosa [1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, T.U. Lisbon,

Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

[a]vera.pires@ist.utl.pt

Keywords: Granite; Cladding; Dowel fixing; Contact; Finite element analysis (FEA).

Abstract. The present work sets out a finite element model for contact analysis of two different dowel fixing conditions for granite cladding. To be used in building facades as cladding materials and ornamental stones, Portuguese granites Cinzento de Alpalhão (SPI) and Amarelo de Vila Real (AVR) are considered with dowel-hole anchorage systems.

FEM for contact analysis was developed (with ANSYS software) for two different dowel fixing conditions: one with regular plastic cap and the other with a fast curing mortar. The differences on strain fields between both granites with the different dowel fixing conditions were studied. Results were also compared with anchorage strength experimental tests, previously performed for the same dowel fixing conditions.

Contact analysis for SPI and AVR materials show that the different dowel fixing conditions originate different strain fields. FEM results explain how different contact conditions influence the overall stiffness of the system (stone-fixing-element-dowel) obtained in the dowel-hole anchorage strength experimental tests for both granites.

Introduction

Facades are considered more than an aesthetical feature of a building. If ventilated, facades are seen as a suitable solution to improve buildings thermal behaviour, reducing energy consumption required for indoor heating along with excellent functionality [1-3]. Facades are often subjected to a wide variety of loading and environmental conditions. This is particularly relevant when a natural brittle material like stone is applied as a cladding material.

The most important engineering characteristics of a stone for cladding are related to its anchorage resistance. Anchorage strength tests made according to each type of fixing system can be employed to assess how stone will behave.

The present study aims understanding how stone panels with dowel-hole fixing system, can be simulated using finite element models (FEM), as a complementary tool employed, for example, in investigation works.

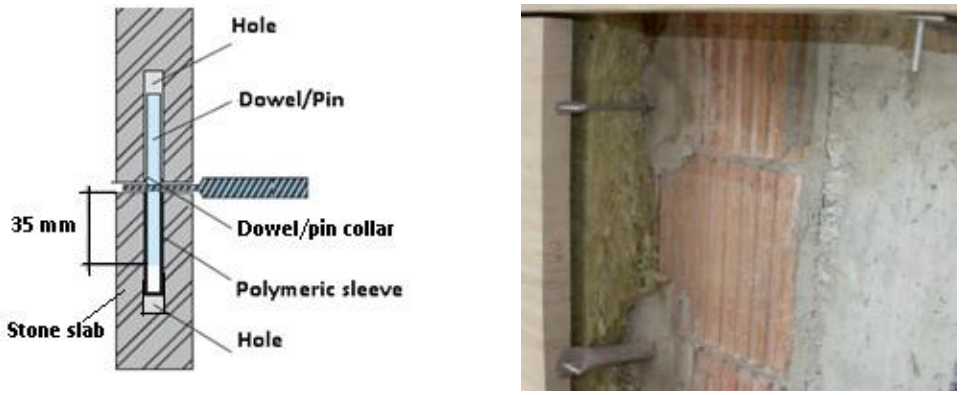
FEM has been used as a tool for supporting the selection of specific materials in distinctive applications such as those using: glass [4], concrete [5-6] and ceramics [7-8], from civil/mechanical engineering [9-10] to biomedical [11] fields.

The development of finite element models for natural stone cladding is reported in several works [12-18]. However, none of these works is fully able to properly define a model for loading and contact processes, in particular assessing the different contact reactions from distinct dowel fixing conditions.

Numerical simulations for contact analysis of two different dowel fixing conditions for granite cladding were developed using ANSYS® software (v11) [19]. Finite elements were applied for the study of two different dowel fixing conditions: one with regular polymeric sleeve (PolS), and the

other with a fast curing mortar (FCM). Both fixing conditions are used for dowel-hole indirect fixing system (Fig. 1).

Dowel-hole fixing systems are particularly suitable for stone slabs with maximum linear dimensions of 1 m^2 [14,16,20]. As shown in *Fig.1*, the system is based on drilled holes at the edge of the slab for dowel (or pin) insertion.



a) *b)*

Fig. 1. *a)* Schematic representation of dowel-hole anchor system, showing its main components: stainless steel dowel/pin; polymeric sleeve; and hole [21]. *b)* Example of a grout-in dowel anchor grouted on a masonry wall to fix stone slabs.

Two Portuguese granites were studied: *Amarelo de Vila Real* (AVR), *Cinzento de Alpalhão* (SPI). According to what was also studied elsewhere [12], rock heterogeneities might limit the applicability of numerical simulations with FEM. Therefore, granites were assumed as homogenous and isotropic in order to simplify the contact analysis.

FEM was used as a complementary tool for characterizing the dowel-hole anchoring systems. The FEM outputs were compared with anchorage strength tests performed for the same dowel-hole fixing conditions [22]. It should be emphasized that anchorage strength test determined through the strength of individual stone anchors is usually studied when stone is applied in a ventilated facade employing a similar anchorage system [22].

Materials

Stone Materials. Two Portuguese granites were studied: *Amarelo de Vila Real* (AVR), *Cinzento de Alpalhão* (SPI), showing an as-sawn surface finishing (*Fig. 2*). This stone selection covers one "grey" and one "yellow" granite, with different mineral compositions, and above all, distinct mechanical properties in what concerns, for example, to Young's modulus, flexural strength and anchorage strength.

AVR was extracted from quarries in *Vila Real* District and SPI, was obtained from quarries in *Portalegre* district (municipality of Nisa).

Macroscopically speaking, AVR is classified as leucocrat, with phaneritic texture of medium to coarse-grain. AVR is a whitish-yellow to brownish-yellow granite, showing some porphyroid tendency, more or less pronounced weathering and incipient foliation [23,24]. In accordance to what is described by [23,25], SPI is classified as fine grained, non-porfiroid, with two micas but dominantly biotitic, with homogeneous grey/bluish colour.

Among natural stones, granites are a major construction material all over the world and an important economic resource not only for cladding but with several other uses [26]. This type of stone is not only one of the most abundant on the earth, but also one of the hardest and most durable, hence widely used for construction [27,28]. When selected for being used as cladding

material, granites are chosen due to the fact they are seen as very durable, uniform, sound, weather-resistant, low porosity materials with huge aesthetical options varying from dark to light tones [29].

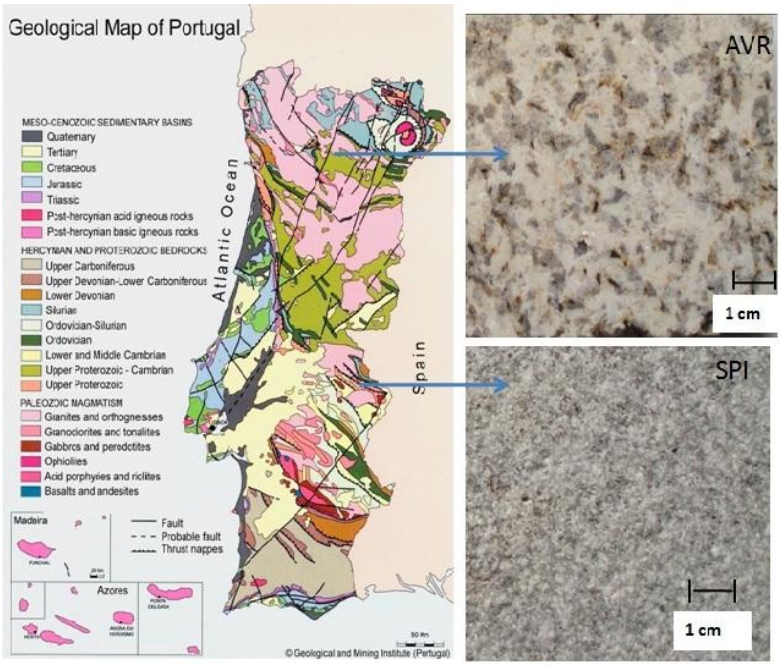
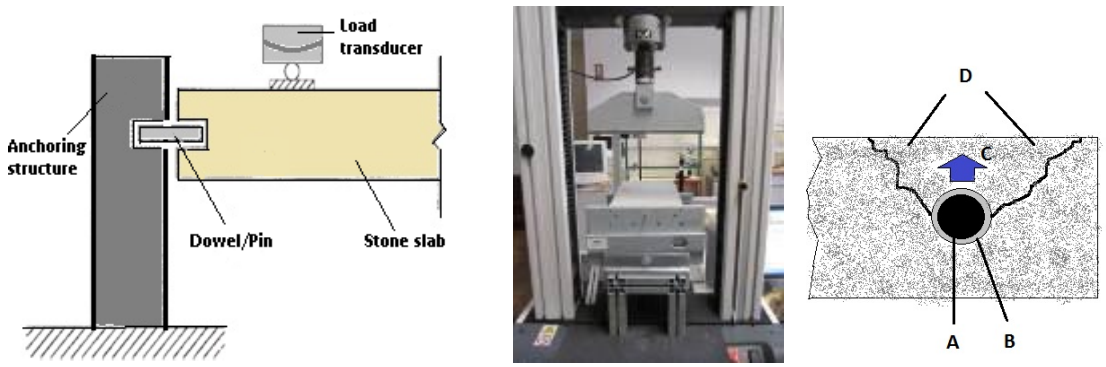


Fig. 2. Geological Map of Portugal (LNEG edition) with identification of the studied granites.

Dowel and Fixing Materials. The two fixing conditions studied in the present work have used stainless steel dowels (A4) with 70 mm long and 5 mm diameter: i) inserted along with polymeric sleeves (PolS) with 35 mm long, 5 and 10 (mm) of inner and outer diameter, respectivly; and ii) introduced with a polyester based FCM that filled completely the drilled holes.

Methods

Dowel-hole Anchorage Strength Tests. Experimental anchorage strength tests were determined for the dowel-hole fixing systems. Tests were carried out using granite slabs with dimensions 400×200×30 mm^3, containing cylindrical holes of 10 mm diameter and 30 mm depth. Tests were conducted in compliance to the ASTM C1354-96 standard [30] (Fig. 3). Tests were performed in an Instron 3369 test machine, at a constant crosshead displacement speed of 1 mm/min.



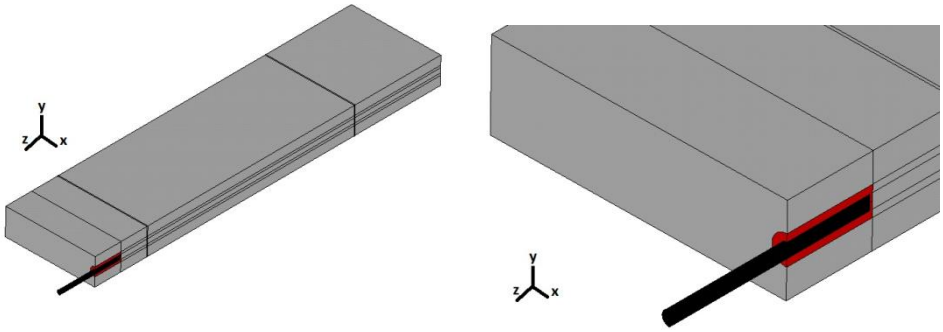
a) *b)* *c)*

Fig. 3. *a)* Lateral schematic representation of the set up used for the anchorage strength tests with the dowel-hole fixing system; *b)* The experimental setup in the Instron 3369 test machine, with

50 kN load cell; *c)* Example of the dowel contact within the drilled hole, where: *A* – Dowel/Pin; *B* – PolS or FCM; *C* – Pressure transferred from the stone to the dowel in the anchor during the breaking load test; and *D* – Schematic rupture wedge representation due to shear/tension stresses developed along a diagonal plane deriving from the line of contact [16].

FEM for Contact Analysis. AVR and SPI experimental anchorage tests conditions were simulated with FEM using ANSYS® software, for both dowel fixing conditions: PolS and FCM. The mechanical behavior of the numerical model was studied through a static analysis.

Model Geometry. A simplification was made in the geometry due to the existence of symmetry conditions. Examples of the FEM generated volumes can be depicted in Fig.4 a) and b).



a) *b)*

Fig. 4. Geometry of the generated volumes: *a)* lateral view of half set: stone slab (grey), PolS/FCM (red), dowel (black); *b)* detail of the contact area.

In this model we assume that the stone hole and dowel are perfectly aligned, although this might not always be accomplished in real fixing conditions.

Elements Definition. For the set: dowel + FCM + stone, *SOLID 95* element was chosen [19]. FCM fixing condition was simply modeled using *Ansys glue* function to describe the interaction between the dowel and the stone. On the other hand, PolS fixing condition was studied using a contact analysis with *CONTA 174* as contact element and *TARGE 170* as target element [19].

Material Properties. Material properties for each one the generated volumes were established, according to Table 1.

Table 13. Material properties considered for numerical modeling

Material	*Young Modulus [GPa]*	*Poisson Coefficient [v]*
AVR granite	14	0.30
SPI granite	39	0.30
Dowel	193	0.27
Polymeric sleeve	0.44	0.40
Fast curing mortar	0.50	0.20

Contact Properties. Contact functions were applied only to model PolS fixing conditions. For this situation two contact pairs were chosen: first pair refers to the contact between the surface of the dowel and the internal surface of the *PolS*; the second pair was defined between the outer surface of the PolS and the internal surface the stone hole.

Contact and target surfaces selection was performed according to the convex/concave rule, in agreement with the ANSYS® software contact manual [19].

In what concerns the contact properties between the different elements, only the friction coefficient was changed in order to describe the different abrasion conditions between: a) the dowel and the polymeric sleeve (assuming a friction coefficient of 0.2); and b) polymeric sleeve and stone (assuming a friction coefficient of 0.5).

Mesh definition. Mesh was refined for the dowel and Pols/FCM volumes. Free mesh tool was used to generate the mesh in the remaining geometry. *Fig. 5* depicts the established mesh.

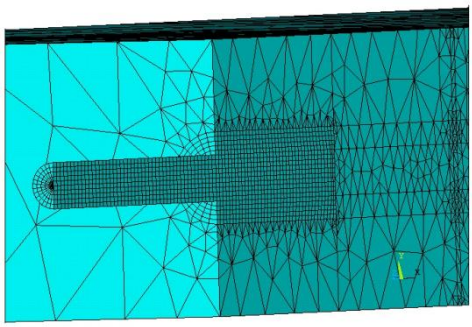


Fig. 5. Generated mesh for the set stone + PolS/FCM + dowel

Loads and Boundary Conditions. Due to symmetry conditions, only half of the geometry was analyzed. Boundary conditions of symmetry were applied in the areas belonging to the symmetry plane (*Fig. 6*). The support was defined according to the experimental set-up for anchorage strength tests [30]. Uniform distributed load of 2000 N was applied along the entire width of the stone slab (depicted in *Fig. 6* only for half width). The outer edge of the dowel was constrained in all degrees of freedom (simulating the anchorage fixing). The distances between the support and load were established in accordance with ASTM C1354-96 standard test method for determining the strength of individual stone anchorages in dimension stone.

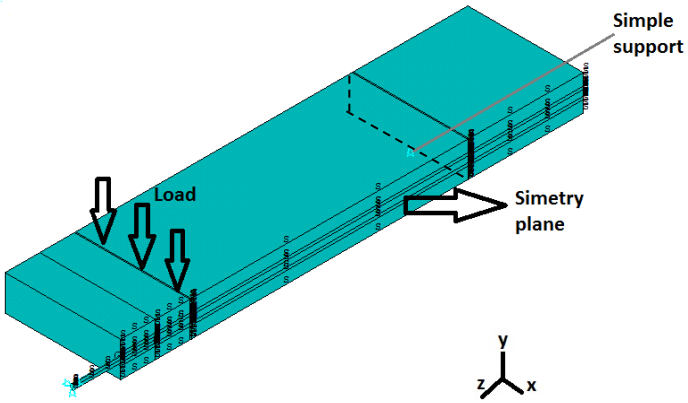


Fig. 6. Schematic representation of symmetry plane and boundary conditions: Load and support.

Results and Discussion

Dowel-hole anchorage strength. Table 2 presents the results of anchorage strength at dowel-hole tests obtained for AVR and SPI. Three parameters / properties were determined from load (F) vs. stroke (ΔL) plots (see examples in Fig. 7 and 8):

- Yield load – defined as the proportional limit; determined as the load at which the F-stroke curve first deviates from a straight line. Visual criteria was used to determine the location where yield occurred;
- Rupture load – determined as the maximum load obtained in each test;

- Stiffness – calculated as the slope of F *vs.* stroke in a pre-determined range between 20 and 80 % of the yield load.

Table 2. Yield and rupture loads for dowel fixed with PolS and FCM for AVR and SPI.

Stone type	*AVR*		*SPI*	
Fixing Conditions	*FCM*	*PolS*	*FCM*	*PolS*
Yield [N] ± sd	1914 ± 618	1083 ± 307	2096 ± 1042	1403 ± 445
Rupture Load [N]	2383 ± 342	1202 ± 185	3405 ± 381	1730 ± 240
Stiffness [N/mm]	1118 ± 221	357 ± 135	1242 ± 525	777 ± 156

Two examples of load *vs.* stroke plots obtained in dowel-hole anchorage strength tests for both types of stones (AVR and SPI) are represented in Fig. 7 for PolS and in Fig. 8 for FCM fixing conditions.

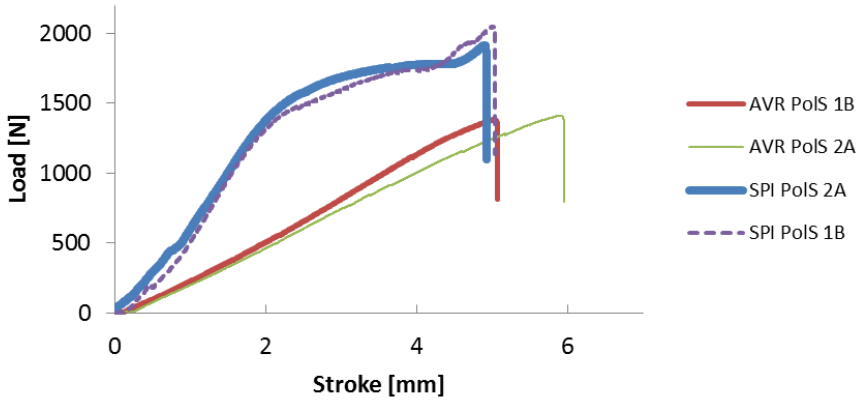


Fig. 7. Load *vs.* stroke plots obtained in AVR and SPI in dowel-hole anchorage strength tests for PolS.

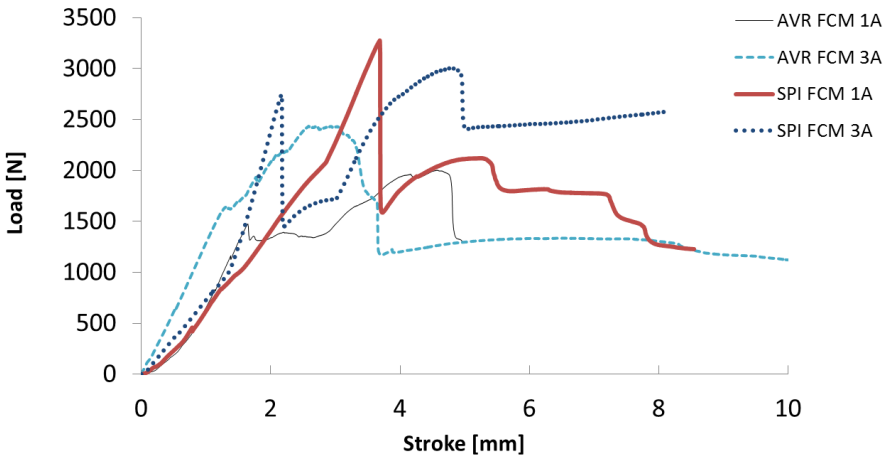


Fig. 8 Load *vs.* stroke plots obtained in AVR and SPI in dowel-hole anchorage strength tests for FCM dowel fixing conditions.

As it is possible to observe from Table 2, in both granites rupture loads are lower when employing PolS dowel fixing. On the other hand, AVR with PolS shows lower rupture loads (1202 ± 185 N) when compared to SPI (1730 ± 240 N).

Figures 9 *a)* and *b)* show examples of AVR and SPI tested specimens after conducting the dowel-hole anchorage strength test, when dowel is fixed with PolS.

a) *b)*

Fig. 9. Examples of tested specimens after dowel hole anchorage strength test for dowel fixed with PolS: *a)* AVR specimen; *b)* SPI specimen.

Figures 10 *a)* and *b)* show examples of AVR and SPI tested specimens after conducting the dowel-hole anchorage strength test, when dowel is fixed with FCM.

a) *b)*

Fig. 10. Examples of tested specimens after dowel hole anchorage strength test in the case of dowel fixed with FCM: *a)* AVR specimen; *b)* SPI specimen.

From the analysis of Figures 9 and 10 it is possible to observe that when fixing a dowel in both granites with PolS, smaller rupture wedges occur.

According to the results in Tab.2, the stiffness values for both sets using with PolS show a clear difference between the sets using AVR (mean value of stiffness: 357 N/mm) and those using SPI (mean value of stiffness: 777 N/mm). This result is also clear in the plots showed in Fig.7. This outcome seems to be related with the Young modulus of both types of stones (AVR: 14.05 GPa; SPI: 38.77 GPa).

On the other hand, although sets using FCM show higher mean values of stiffness (AVR: 1118 N/m; SPI 1242 N/m), results are of the same order, implicating a system with different dependence on stone's Young modulus.

Taking into account that PolS and FCM have approximately the same Young modulus (0.44 and 0.50 GPa, respectively) the differences in the system's stiffness can be explained by the type of contact originated when using two very distinct fixing conditions. When FCM is applied, the entire hole cavity is filed with mortar that will cure and, subsequently, originate a strong adhesion between the dowel and the stone. When load is applied, we expect that inside the cavity both compressive and tensile stresses will occur. In contrast, when PolS is used and load is applied, only

compressive stresses are expected in the hole. This situation occurs because, despite the friction between the different materials, no adhesion is observed between polymeric sleeve and dowel that is free to contact and compress the PolS during the load application.

FEM Analysis. Comparative analysis between FEM of the two dowel fixing conditions (PolS and FCM) was focused on the strain values in the vicinity of the contact areas. Strain along y-axis representation for AVR and SPI with PolS and FCM are depicted in *Fig. 11* and *12*. For better understanding, both fixing conditions were represented at the same scale.

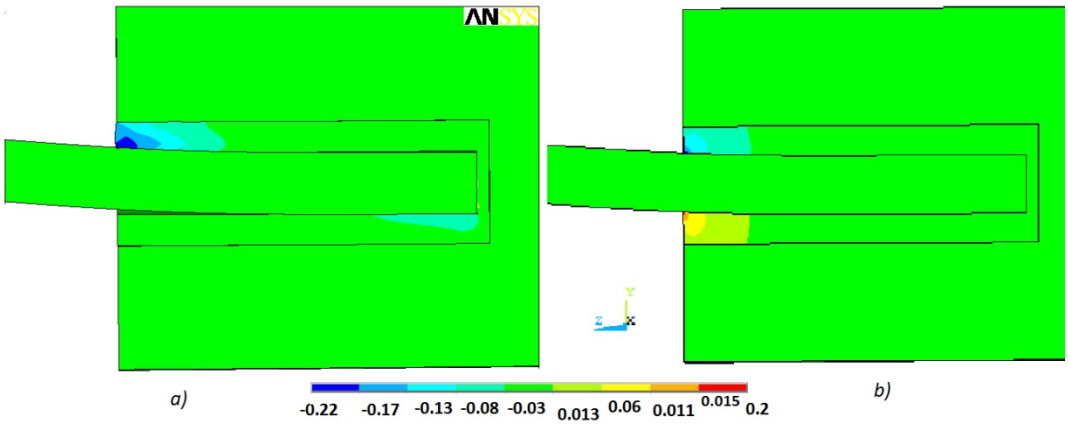


Fig. 11. Strain along y-axis for AVR with: *a)* PolS and *b)* FCM fixing condition.

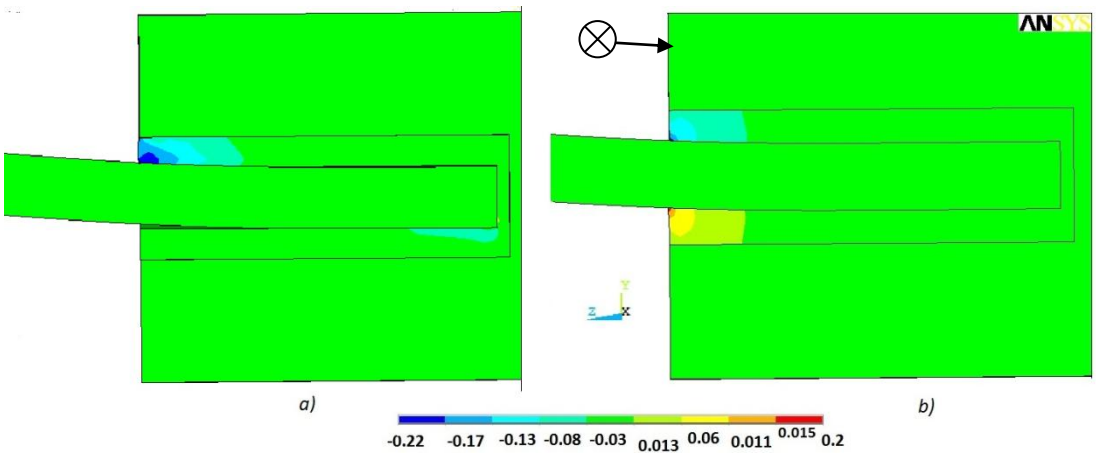


Fig. 12. Strain values for SPI with: *a)* PolS and *b)* FCM fixing condition.

Assuming a linear elastic model, the negative strain values depicted in *Figs. 11* and *12* indicate compressive state and by opposition, positive strain values indicate tensile stress states.

From strain distribution on the dowel-stone surrounding area, it is possible to verify that the developed finite element model shows agreement with the experimental results obtained from anchorage strength test for dowel-hole fixing system.

AVR and SPI FEM shows lower strain intensity when FCM fixing condition is simulated, meaning, for both granites, a higher stiffness in the system when compared to PolS. Therefore, FEM seems suitable to describe the stiffness of the dowel hole anchorage strength tests using both types of fixing conditions.

PolS finite element model (in both granites) originates only negative strain values in the contact area (*Fig. 11* and *12*) meaning that only compressive state occurs; FCM gives origin to positive and negative strain values (*Fig 11* and *12*) meaning that both compressive and tensile states occur in both granites.

Due to scaling effect it is not possible to depict stone strain intensity in simulaton (*Figs. 11* and *12*). To obviate this problem, stone strain nodal analysis was performed in a single line (marked with *x* in *Fig. 12*) for both granites and using both fixing conditions. Strain results obtained in the stones are shown in Table 4.

Table 3. Strain nodal analysis performed in a single line for AVR and SPI with both fixing conditions.

Stone Type	*Fixing condition*	*Strain – y (%)*
AVR	PolS	-0.34
	FCM	-0.10
SPI	PolS	-0.13
	FCM	-0.04

Strain nodal analysis obtained from FEM indicates that, for the same applied load (2000 N), AVR strain is higher for PolS (-0.34%) than for FCM (-0.10%). As we are assuming a linear elastic model and constant load, dowel fixed with PolS leads to higher deformation in stone. Consenquentely, taking into account that the experimental value of rupture load in AVR with PolS was 1202 N (lower than 2000N), this means that strain obtained in the present simulation is thought to be higher than compressive rupture strain of the stone material itself. This result is in accordance to the simulation using AVR with FCM. In that case, experimental value of rupture load was 2383 N (of the same order than 2000N), implicating as foresseen a lower rupture strain in the material. Similar relations were found for SPI.

Although no specific assumptions were made concerning rock's natural formation and natural heterogeneities, both PolS and FCM finite element models presented good agreement with experimental results to explain the differences observed in system stiffness. To better observe how the simulation is in agreement with reality, an example depicting a deformed shape representation of the displacement along y-axis is showed in *Fig. 13* for SPI.

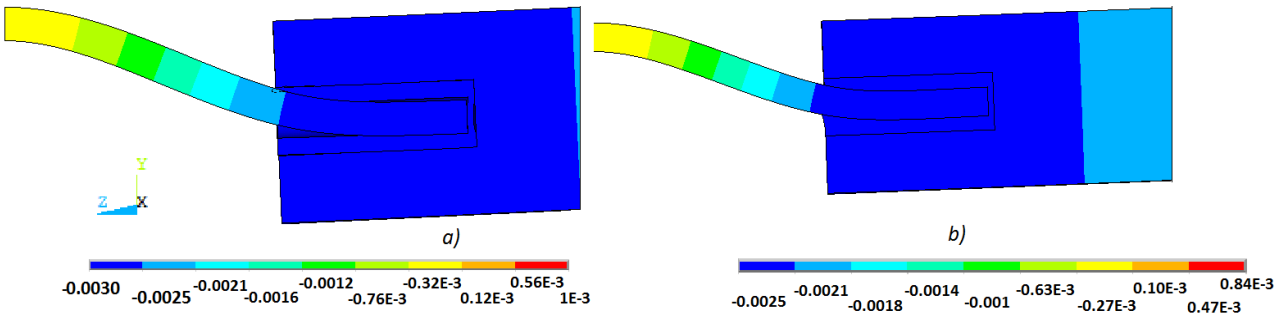


Fig. 13. Deformed shape representation showing displacements (meter) along y-axis for SPI with: *a)* PolS and *b)* FCM fixing condition.

Figures *11 a)*, *12 a)* and *13 a)* clear indicates that when PolS fixing conditions are selected, low stiffness is expected. Although not directly related, higher deformation in systems with brittle material might conduct lower anchorage strength.

Conclusions

Assessment between experimental results and finite element model for AVR and SPI with PolS and FCM fixing conditions, indicate that the developed finite element model might be use as a complementary tool employed, for example, in cladding investigation works with stone materials.

The major limiting factors found in this work for the FEM model are the computational power required for solving large models (with high number of elements), and the assumptions concerning stone heterogeneities (granites were assumed as homogenous and isotropic) that might limit model applicability.

In general, by using only measured material properties and approximating the contact parameters stone-fixing element-dowel to real conditions, FEM shows a reasonable agreement with experimental tests dowel-hole anchorage strength tests for both fixing conditions in AVR and SPI.

References

[1] C. Marinosci, P.A. Strachan, G.L. Morini: Empirical validation and modeling of a naturally ventilated rainscreen facade building, Energy and Buildings, Vol. 43 (2011), Issue 4, p.853-863.

[2] M. Mora Perez, G. Lopez Patino, M.A. Bengochea Escribano, P.A. López Jiménez: Quantification of ventilated facade efficiency by using computational fluid mechanics techniques, Boletin de la sociedad Espanola de cerámica y vidrio, Vol. 50 (2011), Issue 2, p. 99-108.

[3] M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni: Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, Solar Energy, Vol. 75 (2003), Issue 6, p. 491-502.

[4] A. Jain, A.Y. Yi, X. Xie and R Sooryakumar: Finite element modelling of stress relaxation in glass lens moulding using measured, temperature-dependent elastic modulus and viscosity data of glass, Modelling and Simulation in Mat. Science and Eng. Vol. 14, Issue 3 (2006), p. 465.

[5] N. Zhang, C. C. Fu, H. Chec: Experiment and numerical modeling of prestressed concrete curved slab with spatial unbonded tendons, Eng. Structures, Vol. 33 (2011), p. 747–756.

[6] Q. Dai: Three-Dimensional Micromechanical Finite-Element Network Model for Elastic Damage Behavior of Idealized Stone-Based Composite Materials, Journal of Eng. Mec., Vol. 137 (2011), Issue. 6, p. 410-421.

[7] C. Jiang, G. Liu, D. Zhang and X. Xu: FEM Analysis of Grinding Damage Mechanisms for Ceramics Materials, Materials Science Forum, Vol. 532 – 533 (2006), p. 432-435.

[8] R.C. Yu, G. Ruiz, A. Pandolfi: Numerical investigation on the dynamic behavior of advanced ceramics. Eng Fract Mech, Vol. 71 (2004), p. 897–911.

[9] Azevedo, A. F. M., in: *Método dos Elementos Finitos*, 1ª ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Abril (2003).

[10] P. J. Fanning, T.E. Boothby: Three Dimensional Modelling and full scale testing of stone arch bridge, Computers and Structures Vol. 79 (2001), p. 2645-2662.

[11] F. Mollica, L. Ambrosio: The Finite Element Method for the Design of Biomedical Devices, Biomaterails in Hand Surgery, (2009), p.31-45.

[12] O.K. Mahabadi, B.E Cottrell., G. Grasselli: An Example of Realistic Modelling of Rock Dynamics Problems: FEM/DEM Simulation of Dynamic Brazilian Test on Barre Granite, Rock Mech. and Rock Eng., Vol.43 (2010), p.707–716.

[13] W.C. Zhu , C.A. Tang: Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 43 (2006), p. 236–252.

[14] R.S.Camposinhos: Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Mecânica: Dimensionamento e Projecto. 1ª ed., Lisboa: Edições Sílabo, 2009, pp. 32-38.

[15] L. Jacobsson, M. Flansbjer, B. Schouenborg, B. Grelk, A. Smits: Expert System for Dimensioning of Façade Cladding, Global Stone Congress, Alicante, Spain (2010).

[16] M.D. Lewis, in: *Modern Stone Cladding – Design and Installation of exterior Dimension Stone Systems - ASTM MNL 21*, edited by American Society for testing Materials, Philadelphia (1995), p.7-22.

[17] R.S. Camposinhos, R.P.A. Camposinhos: Dimension stone cladding design with dowel anchorage. Construction Materials - Thomas Thelford Journals, Vol. 162 (2009), p. 93-138.

[18] R.S.Camposinhos, P.M. Amaral, L.G. Rosa, V. Pires: (2008) Dimension stone cladding design – Dowel Anchorage Design, paper presented at Int. Congress of Dimension Stones (2008), Carrara, Italy, 29th – 31st May, p. 203-207.

[19] ANSYS – ANSYS Structural Analysis Guide, ANSYS Release 9.0, ANSYS, Inc., Nov. 2004.

[20] V. Pires, P.M. Amaral, L.G. Rosa, R.S. Camposinhos: Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design, Const. and Bui. Mat., Vol. 25 (2011), Issue 10, p.3966-3971.

[21] HALFEN Technical Product Information. Natural stone support systems – facade. FS 10.1-E (2011).

[22] V. Pires, L.G. Rosa, V. Infante, P.M. Amaral, A. Pacheco: Effect of dowel Fixing Conditions on Anchorage Rupture Loads and Rupture Angles of two Portuguese Granites, XIII Portuguese Conference on Fracture, (2012) Coimbra, Portugal.

[23] Casal Moura, A., in: *Granitos e Rochas Similares de Portugal*, Edição Instituto Geológico e Mineiro, Marca–Artes Gráficas, Porto (2000).

[24] J.A.R.S. Simão, in: *Rochas ígneas como pedra ornamental – Causas, condicionantes e mecanismos de alteração Implicações tecnológicas*, PhD thesis, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências da Terra, Lisboa (2003).

[25] A.Moreira: Reconhecimento geológico, estrutural, petrográfico e geoquímico dos granitos de Alpalhão, Gáfete e Quareleiros (Alto Alentejo), in: *Estudos, Notas e Trabalhos*, Instituto Geológico e Mineiro (1994), Issue 36, p. 103-117.

[26] R.S. Hamilton, in: Air Pollution and Damage To Building Stone, Chemical Analysis of Granites From Quarries and Monument, *Environmental protection and conservation of the European cultural heritage – proceedings of the EC workshop*, Edited by European Comission, Santiago de Compostela, Spain, 28-30 Nov. (1996).

[27] M.H.B.O. Frascá, , J.K. Yamamoto, in: Ageing tests for dimension stone - experimental studies of granitic rocks from Brazil, paper present at *10th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment – Engineering geology for tomorrow's cities*, Nothingam, UK, 6th – 10th September (2006), paper nr. 24.

[28] M. Vargas, C. Maqueda, , M.L. Franquelo, J. García Talegón, J.L.P. Rodrígues, in: Chemical Analysis of Granites From Quarries and Monument, *Environmental protection and conservation of the European cultural heritage – proceedings of the EC workshop*, Edited by European Comission Santiago de Compostela, Spain, 28-30 Nov. (1996).

[29] A. Casal Moura, V. Pires: Selecção de rochas ornamentais – Casos de estudo, Arquitectura e Vida, Ed. Loja da Imagem, Issue 88 (2007).

[30] ASTM 1354-96, Standard Test Method for Strength of Individual Stone Anchorages in Dimension Stone.