

**Contributo do ensaio de cilindro oco para o estudo da
fraturação em rochas com recurso à medição de emissões
acústicas**

João Miguel Mourato Vermelho Neves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Geológica e de Minas

Orientador: Prof. Dra. Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta Costa e Silva

Júri

Presidente: Prof. Dra. Maria Teresa da Cruz Carvalho

Orientador: Prof. Dra. Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta Costa e Silva

Vogais: Prof. Dr. Fernando de Oliveira Durão

Outubro 2015

Agradecimentos

Este trabalho estaria hoje por concluir não fosse a ajuda e o apoio que, em doses massivas e sob tantas formas, me foram prestadas. Aproveito esta página para deixar o meu mais profundo agradecimento a todos os que com a sua paciência, insistência e amizade me ajudaram a vencer dificuldades e a inércia de tantas paragens até aqui.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, à Francisca e à minha irmã por toda a motivação, o apoio, pela incondicional disponibilidade para ajudar em tudo o que foi necessário, por aturarem as minhas horas trocadas e os meus momentos de insuportabilidade absoluta.

Um muito sincero agradecimento à professora Matilde, pela incansável preocupação, incitamento e motivação e pela constante disponibilidade.

Deixo também um grande agradecimento ao Dr. Gustavo Paneiro por toda a ajuda, paciência e concelhos que me deu. Um especial agradecimento ao Prof. Fernando Durão, cuja ajuda, conhecimentos, tempo e concelhos foram essenciais para resolver os mais complicados problemas com o processamento dos dados.

Por último um agradecimento ao Sr. Paulo Fernandes pelos banhos de óleo hidráulico que levou, pelas horas tardias e pelas vezes que teve de ouvir: *“vamos ter que repetir o ensaio”*.

Resumo

A presente dissertação teve por objetivo dar um contributo para o desenvolvimento do ensaio de cilindro oco enquanto ferramenta para estudar a fraturação em rochas. Para esse efeito foi desenvolvida uma metodologia para captar e localizar a origem das emissões acústicas produzidas aquando da rotura da rocha. Os ensaios realizados foram também desenvolvidos no âmbito do presente trabalho, consistindo no carregamento interno até à rotura franca de cilindros ocos de paredes grossas, triaxialmente confinados. Para localizar a origem das emissões acústicas foi desenvolvida uma rede neuronal a qual foi treinada com eventos acústicos artificiais utilizando a fonte de Hsu-Nielson. A rede treinada simula o problema inverso da localização e é utilizada como *input* na resolução da localização dos eventos detetados. Os resultados da localização utilizando a metodologia desenvolvida apresentam boa concordância com a análise visual dos espécimens ensaiados, sendo o erro da localização próximo do dos sensores.

O ensaio foi simulado com RFPA e os resultados da simulação comparados com os laboratoriais. Foram ainda analisados os perfis energéticos dos ensaios o que permitiu retirar conclusões relativas à importância das condições de fronteira dos ensaios para a eficácia na localização dos eventos detetados. Identifica-se também uma assinatura energética característica para este ensaio.

Palavras-chave: Emissões Acústicas, Localização de EA, Redes Neurais Artificiais, Ensaio do Cilindro Oco, Simulação RFPA, Análise do Perfil Energética.

Abstract

The present work aims to contribute to the development of the hollow cylinder test as a means to study the fracturing in rocks. For this purpose it was developed a methodology to record and locate the source of the acoustic emissions during the rock failure. The laboratory tests were also developed for this work, consisting on internally loading, leading to frank rupture, a triaxially confined thick walled hollow cylinder. In order to locate the source of AE it has been developed an artificial neural network, which was trained with artificial acoustic events using Hsu-Nielsen's Source. The trained artificial neural network simulates the response time to the inverse location problem and is used as input in the resolution of the location of detected events. The AE location using this methodology shows good agreement with the visual analysis of specimens tested, and the error of the achieved location is near to that of the sensors.

This hollow cylinder test was also simulated with RFPA and the results are compared with the laboratory. Then both laboratory tests and RFPA's energy profiles were analysed which allowed to draw conclusions on the importance of boundary conditions of the tests for effectiveness on the accurate location of detected events. It was also identified a characteristic energy signature for this hollow cylinder test.

Keywords: Acoustic Emissions, AE Source Location, Artificial Neural Networks, Hollow Cylinder Test, RFPA Simulation, Energy Profile Analysis.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Ensaio de Cilindro Oco.....	4
1.2	Emissões Acústicas	6
1.2.1	Introdução Histórica.....	6
1.2.2	Origem das emissões acústicas em rochas sujeitas a tensões de confinamento.....	8
1.2.3	Onda de emissão acústica – onda elástica	8
1.2.4	Captura e registo de emissões acústicas em laboratório.....	8
1.2.5	Medição de emissões acústicas em ensaios triaxiais	13
1.2.6	Localização de EA.....	14
2	Procedimento experimental.....	17
2.1	Material Ensaiado.....	17
2.2	Equipamento Utilizado	17
2.2.1	Grupo Mecânico	17
2.2.2	Grupo de Aquisição de Dados.....	22
2.3	Montagem do Ensaio	26
2.3.1	Preparação dos provetes.....	26
2.3.2	Tensão Radial Interna	26
2.3.3	Tensão Axial.....	28
2.3.4	Tensão de Confinamento (Radial Externa)	28
2.4	Controle dos tempos máximos entre sensores e validação dos sensores.	29
2.5	Carregamento radial interno até à rotura franca.	30
2.6	Aquisição e tratamento de dados.....	32
2.6.1	Filtragem do ruído electrostático.	33
2.6.2	Emparelhamento dos Eventos Acústicos.	33
3	Localização da origem das EA	37
3.1	Matriz de treino.....	37
3.2	Rede Neuronal Artificial.....	39
3.2.1	Estrutura dos neurónios da camada escondida	41
3.2.2	Treino da Rede Neuronal Artificial.....	42

3.3	Resolução do Problema Inverso	44
3.3.1	Constrangimentos impostos à minimização da função objectivo ε	45
3.3.2	Aproximação inicial x_0 em função de Tj	45
3.4	Teste da precisão do sistema	47
3.5	Resultados da localização.....	48
4	Simulação RFPA e Análise das Energias.....	51
4.1	Simulações dos ECO em RFPA.....	52
4.2	Perfis Energéticos das Simulações RFPA	55
4.3	Perfis Energéticos dos Ensaios Laboratoriais.....	59
5	Conclusões	63
6	Trabalhos Futuros.....	65
7	Bibliografia	66

Índice de Figuras

Figura 1 – Acelerómetro piezoeléctrico. Modelo KS91B da Manfred Weber - Metra Mess- und Frequenztechnik, Alemanha.	11
Figura 2 – Transdutor EA.	11
Figura 3 – Corpo da célula triaxial de Hoek.	18
Figura 4 – Tampas da célula triaxial de Hoek.	18
Figura 5 - Representação da Célula de Hoek modificada e instrumentada.	19
Figura 6 – Sensores acondicionados na camisa e cabos fixos às paredes.	19
Figura 7 - Inserção dos cabos coaxiais na base da camisa da célula de Hoek.	20
Figura 8 – Adaptação do embolo inferior.	20
Figura 9 - Embolo superior.	21
Figura 10 - Prensa Hidráulica e Célula de carga.	21
Figura 11–Macacos Hidráulicos.	22
Figura 12 - Esquema do encadeamento do sinal recolhido pelos sensores.	22
Figura 13 – Elemento piezoeléctrico.	23
Figura 14 – Sensor Transdutor EA encapsulado.	23
Figura 15 – Os 4 pré-amplificadores numerados de 1 a 4, identificando-os respectivamente com cada um dos sensores.	24
Figura 16 - Amplificador PXMA, processador de sinais de EA. A luz amarela no canal 1 é indicativo de que apenas o pré amplificador dedicado ao sensor 1 está conectado.	24
Figura 17 - Pormenor do controlo dos filtros passo-alto e do ganho no Amplificador PXMA.	25
Figura 18 - Dimensões finais do provete para ensaio.	26
Figura 19 – Mangueiras introduzidas com sonda de arame.	27
Figura 20 – Embolo superior – provete.	27
Figura 21 – Pormenor da montagem do ensaio.	28
Figura 22 – Ambiguidade no emparelhamento dos eventos acústico.	33
Figura 23 – Evento acústico parcialmente detectado.	34
Figura 24 – Um instante de detecção.	35
Figura 25 – Malha da matriz de treino, PVT3.	37
Figura 26 - Coordenadas Cilíndricas	38
Figura 27 – Fonte de Hsu-Nielsen, adaptado de(SAUSE, 2011).	38

Figura 28 - Diagrama da rede neuronal. Gerado automaticamente em MATLAB.	41
Figura 29 - Distribuição dos erros entre os valores esperados e os valores aproximados pela rede neuronal. O eixo das abcissas em ns e sendo o das ordenadas a frequência.....	44
Figura 30 - Localização dos eventos de treino do especimen PVT1 utilizando a rede neuronal artificial treinada com os eventos de treino do especimen PVT2.	47
Figura 31 - À esquerda o histograma dos erros de localização para a coordenada x, à direita o histograma dos erros de localização para a coordenada y.	48
Figura 32 - Histograma dos erros de localização na coordenada z.	48
Figura 33 - Localização dos eventos acústicos no ensaio do especimen PV27, com confinamento radial externo e axial a 1 MPa.	49
Figura 34 – Localização dos eventos acústicos no ensaio do especimen PV28, com confinamento radial externo e axial a 2 MPa.	49
Figura 35 - Localização dos eventos acústicos no ensaio do especimen PV34c, com confinamento radial externo e axial a 3 MPa.	49
Figura 36 - % EA localizadas vs EA detectadas por confinamento.	50
Figura 37 - % EA localizadas vs. EA detectadas por blocos.	50
Figura 38 - Simulação RFPA2D para o ensaio com 1 MPa de confinamento axial e radial.	53
Figura 39 - Simulação RFPA2D para o ensaio com 2 MPa de confinamento axial e radial.	53
Figura 40 – Fotografias dos ensaios PV32 e PV34c tiradas imediatamente após o ensaio.....	54
Figura 41 – Simulação RFPA2D para o ensaio com 3 MPa de confinamento axial e radial.	54
Figura 42 - Perfil Energético da Simulação RFPA2D para confinamento a 1 MPa.	55
Figura 43 - Perfil Energético da Simulação RFPA2D para confinamento a 2 MPa.	56
Figura 44 - Perfil Energético da Simulação RFPA2D para confinamento a 3 MPa.	56
Figura 45 – Energia das simulações RFPA.	57
Figura 46 – Energia acumulada das simulações RFPA.....	57
Figura 47 – Energias médias acumuladas (RFPA).....	58
Figura 48- Energia média por EA (RFPA).....	58
Figura 49 - Perfil Energético do ensaio laboratorial sobre o especimen PV27 com tensão de confinamento de 1 MPa.	59
Figura 50 - Perfil Energético do ensaio laboratorial sobre o especimen PV28 com tensão de confinamento de 2 MPa.	59
Figura 51 - Perfil Energético do ensaio laboratorial sobre o especimen PV34c com tensão de confinamento de 3 MPa.	60
Figura 52 – Energia média por EA (Laboratório).	61

Figura 53 – Histograma da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, especimen PV27 ensaiado com confinamento radia e axial de 1 MPa.	61
Figura 54 – Histograma da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, especimen PV28 ensaiado com confinamento radia e axial de 2 MPa.	62
Figura 55 – Histograma da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, especimen PV34c ensaiado com confinamento radia e axial de 3 MPa.	62

1 Introdução

A Europa enfrenta neste momento um ambiente de incerteza quanto ao futuro do fornecimento energético. Os sentimentos nuclear-cépticos proliferam um pouco por toda a Europa, depois de Fukushima (World Nuclear Association, 2014). A opção de remover, a médio-longo prazo, a energia nuclear do *mix* energético europeu, acarreta como consequência imediata o reforço do peso dos outros componentes na equação do fornecimento energético (WETTMANN, 2011). Nomeadamente cresce a dependência de hidrocarbonetos, sejam eles carvão ou gás, aumentando assim a dependência energética da Europa relativamente ao exterior (WETTMANN, 2011). Esta opção entra em conflito com os objetivos de independência energética definidos na estratégia Europa 2020 (European Commission, 2011).

Com a instabilidade crescente no Médio Oriente e no Norte de África, acrescido da instabilidade na Ucrânia e tensões crescentes entre a Federação Russa e a União Europeia, (UE), a dependência excessiva das importações de gás russo amplificam a evidente necessidade de independência energética da Europa (Pirani, Henderson, Honoré, Rogers, & Yafimava, 2014).

O advento do gás de shale, em meados da década passada, possibilitou aos Estados Unidos da América, (EUA), uma mudança radical no panorama energético (Melikoglu, 2014). Graças a avanços significativos nas técnicas de perfuração horizontal e dirigida, bem como nas técnicas de fracturação hidráulica (FH), passa a ser viável explorar comercialmente o gás aprisionado na rocha mãe. Isto, aliado às enormes reservas encontradas nas bacias Marcellus, Haynesville e Barnett (U.S. Energy Information Administration, 2011), contribuiu de forma determinante para que os EUA passassem de maior importador mundial a exportador de hidrocarbonetos.

O gás de shale é portanto, apontado por alguns (ex: Papatulica, 2014; Weijermars, 2013), como sendo de evidente interesse para a Europa, nomeadamente devido a descobertas de reservas importantes na Europa Central (Weijermars, 2013). A exploração de reservas de gás de shale europeias, apresenta-se assim, como uma plataforma possível para uma maior independência energética. Contudo, existem condicionantes à exploração deste recurso, nomeadamente de natureza ambiental. Como acima referido, a exploração deste recurso assenta na recuperação do gás contido nas formações de shale, que por natureza têm uma permeabilidade muito reduzida. Assim, o que de facto permite a sua exploração é o emprego de tratamentos de FH no furo de produção. Este tratamento têm por objetivo abrir fraturas para dentro do maciço, aumentando assim a superfície exposta ao furo de forma a que este contacte com o maior volume possível de rocha mãe e, conseqüentemente, aumente a produção do furo.

A FH apresenta desafios importantes para a indústria. Um misto de informação e desinformação (Hayashi, Ligerio, & Schiozer, 2010) relativo a situações nos EUA levanta uma celeuma, originando vozes de oposição à utilização desta técnica na Europa, chegando-se mesmo à proibição da mesma em solo Francês (Patel, 2011). Algumas das condicionantes apontadas à utilização desta técnica são:

- Incertezas quanto à estabilidade geomecânica dos terrenos adjacentes às formações exploradas, uma vez que se promove a sua fraturação;
- Possível contaminação de aquíferos suprajacentes às formações de shale;
- Fugas de gases de efeito de estufa (CO₂, CH₄) para a atmosfera;
- Possível contaminação dos solos, com consequências para a fauna, flora e saúde humana.

Vários relatórios de agências governamentais apontam para que falha humana tenha estado na origem da maioria dos acidentes registados. No entanto, existem registos de alguns acidentes, com consequências mais ou menos graves, que resultam da aplicação da técnica de FH.

A extensão das fraturas, originadas pela FH, é demasiado curta para que haja o risco de estas chegarem à superfície (G. E. King, 2012). Existe contudo, o risco de interseção entre fraturas originadas pela FH com fraturas preexistentes ou com furos abandonados na sua vizinhança (G. E. King, 2012). Esta interconexão entre fraturas constitui um caminho de baixa resistência para a percolação não só de gás de shale, mas também de fluidos de FH, bem como de sais que possam ter sido dissolvidos nestes.

A resposta dos operadores a esta questão passa pelo estudo em pormenor, *à priori*, do estado das formações geológicas (BP plc, 2012), procurando identificar possíveis riscos. Contudo, nem sempre se consegue inventariar a totalidade do risco, pelo que um dimensionamento mais pormenorizado das metodologias é essencial. Por este motivo, muitos investigadores estão a estudar, em detalhe, a forma como o processo de fracturação se desenvolve quando se utiliza a FH, tentando constituir modelos e meios de prever o caminho e extensão das fraturas originadas (G. E. King, 2012). Existem também ineficiências ao nível da propagação das fraturas em estruturas sedimentares pré-fraturadas, bem como fenómenos de enviesamento da direção das fraturas.

A resolução destes problemas exige uma maior compreensão dos mecanismos de rotura da rocha e da progressão da fraturação, o que implica também, a investigação da alteração do estado de tensão nas imediações do furo.

Por ser um ensaio triaxial, o ensaio de cilindro oco, doravante denominado ECO, permite estudar estes fenómenos de uma forma simplificada. Quando solicitado até à rotura por uma tensão radial interna, o *specimen* rompe por tração, o que permite, em parte, estudar a forma da rotura das paredes de um furo nos tratamentos de FH. Além disso, este ensaio pode ser realizado fazendo apenas algumas adaptações à célula triaxial de Hoek, o que o torna pouco dispendioso e relativamente fácil de executar.

Para possibilitar tal estudo, é no entanto necessário capturar e registar a propagação das fraturas. Tal pode ser realizado através do estudo e localização das emissões acústicas, (EA), capturadas através de um conjunto de transdutores.

O objetivo deste trabalho, é desenvolver um contributo para o estudo dos mecanismos de rotura da rocha, recorrendo para o efeito ao cilindro oco que, pela sua geometria, se aproxima às características de um furo. A captura e localização de emissões acústicas em cilindros ocios para este tipo de estudos apresenta diversos problemas. Problemas esses que vão desde a ausência de um método consensual

para a interpretação dos dados, passando pela grande quantidade de recursos necessários, até à geometria complexa que impede a propagação direta das ondas. Por este motivo, o trabalho focar-se-á primariamente na resolução deste problema. Isto é, no desenvolvimento de uma metodologia que permita a localização da origem das emissões acústicas lidando com os constrangimentos geométricos do ECO e do equipamento disponível.

O ensaio realiza-se numa célula triaxial de Hoek. Dentro desta, um provete cilíndrico oco será solicitado por uma tensão interior até que se dê a rotura do mesmo. O ensaio inicia-se num estado de tensão hidrostático, sendo a tensão interna lentamente incrementada. As tensões são transmitidas ao provete por meio de uma prensa hidráulica, e pela manga externa da célula de Hoek, respetivamente tensão axial e radial exterior. A tensão radial interior é transmitida através de uma manga interior pressurizada através de um macaco hidráulico. A manga serve para simular o *casing* do furo, ao mesmo tempo que impede que a injeção do fluido na matriz da rocha acione outros mecanismos de fraturação, simplificando o ensaio.

Embora seja uma componente importante dos tratamentos de fraturação hidráulica, a injeção de fluido na matriz da rocha tornaria difícil a obtenção de conclusões. De facto, a presença e percolação de fluido, em vários regimes de escoamento, dentro do provete introduz complexidade acrescida a vários níveis. Em primeiro lugar, induziria EA não derivadas da rotura de elementos da matriz da rocha. Em segundo lugar, a presença de fluido incluído na matriz da rocha e a variação do seu volume e pressão ao longo do ensaio, introduziria mais complexos componentes de heterogeneidade na função de velocidade real das ondas sísmicas. Estas, aliadas à componente induzida pela heterogeneidade própria da debilitação mecânica da matriz da rocha, tornariam difícil a obtenção de um modelo de velocidades válido que permitisse a interpretação dos dados.

Os dados de emissões acústicas são capturados por quatro sensores distribuídos à volta do provete. Os tempos e amplitudes são registados, possibilitando a posterior transformação e análise dos dados. Para auxílio do tratamento dos dados, é criado um modelo de velocidades e despiste de ambiguidades. Este é baseado numa grelha discreta de pontos, que é concebida através da técnica de treino dos sensores. Com a informação destes blocos, elabora-se um algoritmo de emparelhamento dos eventos registados pelos sensores e procede-se à localização da origem dos eventos.

Ao longo do ensaio as tensões interna e de confinamento são monitorizadas, permitindo a determinação da tensão referente a cada evento através de uma interpolação linear.

Os dados dos ensaios e a localização das EA são por fim comparados com os resultados de simulação num *software* de elementos finitos, RFPA, que tem em conta o grau de heterogeneidade da rocha e que permite projetar as EA e o estado de tensões no interior do provete ao longo do ensaio.

Espera-se assim com este trabalho, obter um algoritmo funcional de emparelhamento das emissões acústicas e localização da origem das mesmas, para ensaios de cilindro oco, bem como utilizar o resultado desse algoritmo para avaliar o desempenho do software RFPA, na simulação da rotura franca por tração num ECO.

1.1 Ensaio de Cilindro Oco

A utilização do ECO em trabalhos experimentais remonta ao início do século XX, conforme apurado por M. Alsayed (Alsayed, 2002). No seu trabalho, Alsayed faz referência a uma publicação de Frank D. Adams no *The Journal of Geology*, onde este, na sequência de um debate em torno da profundidade a que qualquer cavidade ou poro na rocha colapsa, cita A. Parsons.

Em 1904 A. Parsons terá comentado: “Seria contudo interessante sujeitar um cilindro de granito ou quartzito, cuidadosamente aprovisionado num molde de aço, no centro do qual seria aberto um pequeno furo, a uma pressão de, digamos, 100 ton/sq in e observar a “contração” daí resultante.” (Adams, 1912).

Na sequência deste comentário, Adams realizou os primeiros ensaios em cilindros ocos. Os resultados do seu trabalho experimental foram analisados matematicamente e publicados no mesmo ano por L. King. Este discute também no seu trabalho os tipos de fraturas que se podem desenvolver em provetes cilíndricos ocos, sujeitos a uma panóplia de estados e condições de tensão, assim como a diferentes confinamentos (L. V. King, 1912).

O trabalho experimental de Adams é repetido por P. W. Bridgman, desta feita em condições de confinamento e estados de tensão diferentes (Alsayed, 2002).

No seguimento do trabalho pioneiro de Adams, têm vindo a ser realizados ensaios com cilindros ocos em diversas investigações. O estudo da resistência e deformação de rochas sujeitas a pressões de confinamento, tanto biaxiais como poliaxiais, tem dado especial ênfase aos ECO. Segundo Alsayed, tal deve-se ao facto deste tipo de condições não serem possíveis de reproduzir com recurso a ensaios convencionais (Alsayed, 2002).

Nesta linha de investigação existem exemplos como o de E. Robertson, que estudou a resistência de várias rochas, introduzindo como variáveis o tamanho e geometria das amostras, ensaiando diferentes rácios de diâmetro interno e externo do cilindro oco (Robertson, 1955).

Um estudo semelhante foi realizado em amostras de carvão, também recorrendo a ECO sujeitos a tensões biaxiais (Hobbs, 1962) e poliaxiais (Pomeroy & Hobbs, 1962).

O ECO foi também utilizado para investigar em que condições de tensão é que o fenómeno de “*core discing*” ocorre (Obert & Stephenson, 1965).

Noutra linha de investigação, foram realizados ECO em rochas graníticas e calcárias, com vista a investigar a influência da tensão principal intermédia na resistência da rocha (Mazanti & Sowers, 1966). Ensaios semelhantes foram realizados em calcários de Solenhofen e dolomites de Blair, com o intuito de investigar a influência da tensão principal intermédia na rotura da rocha (Handin, Heard, & Magouirk, 1967).

Também o estudo da influência da homogeneidade recorre ao ECO. O mecanismo de rotura em rochas isotrópicas foi investigado por Hoskins, ensaiando para o efeito cinco tipos de rochas diferentes (Hoskins, 1969). Com o intuito de estudar o comportamento plástico em rochas salinas, foram

ensaiados cilindros ocos submetidos a campos de tensão poliaxiais (Senseny, Mellegard, & Wagner, 1989).

Uma metodologia para a determinação de parâmetros elásticos que permitam a descrição do comportamento mecânico de rochas com anisotropia transversa foi conseguida, com ensaios triaxiais em cilindros ocos sujeitos a um binário. Esta metodologia possibilitou ainda a determinação direta do módulo de rigidez das mesmas (Talesnick & Ringel, 1999).

O ECO tem também sido utilizado no estudo de casos práticos, como por exemplo, na investigação das propriedades termo-mecânicas na Zona Perturbada pela Escavação, EDZ, de túneis de armazenamento de material radioativo. Permitindo investigar o comportamento mecânico da formação na vizinhança das cavidades, possibilitando assim um melhor planeamento das operações de escavação e drenagem das mesmas (Labiouse & Vietor, 2013).

Outro exemplo da utilidade do ECO é o da obtenção de informação relativa à heterogeneidade e anisotropia em formações de shale, para calibração dos modelos de simulação de furação em regime *Underbalanced Drilling*, UDB, (Islam & Skalle, 2011).

Atualmente uma das aplicações mais recorrentes do ECO é no estudo da estabilidade/colapso de furos. Neste último caso, o colapso do furo é estudado reduzindo a pressão interna do mesmo, mantendo a pressão de confinamento externa constante, até que o gradiente entre a pressão interna e externa seja tal que leve as paredes do furo à rotura.

O ECO permite a recriação de quaisquer condições de tensão num furo, quer em rocha relativamente impermeável ou permeável, utilizando-se neste último caso uma membrana ou resina (Barla, Bertacchi, Rossi, & Vielmo, 1986), por forma a simular a ação da lama que impermeabiliza as paredes do furo.

Por outro lado, a geração de fraturação hidráulica pode ser simulada aumentando a pressão dentro do furo (Fjær, Holt, Raaen, Risnes, & Horsrud, 2008), até que esta satisfaça os valores do critério de rotura à tração. Isto é, uma das aplicações possíveis do ECO é a simulação de um ensaio de Micro-Frac (MF), ou Micro-FH, com a vantagem de ser possível realizar este ensaio em condições de confinamento triaxial. O que por sua vez, aproxima o ensaio das condições reais em que os tratamentos de fraturação hidráulica são efetuados.

O ECO, embora com reconhecido valor na caracterização das propriedades mecânicas das rochas, não tem qualquer norma associada à sua realização. De facto, nem sequer é mencionado no *ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring* (Ulusay & Hudson, 2007).

Esta ausência de consenso em torno do ensaio tem diversas razões de ser, entre as quais: o demorado e difícil processo de preparação (Dinis da Gama, 2011); a vasta diversificação nas configurações e parâmetros usados no ensaio, desde o rácio entre os diâmetros do provete e do furo, até à própria dimensão do provete.

Não obstante, devido à sua geometria, o provete cilíndrico oco é naturalmente o objeto preferencial para conduzir, à escala laboratorial, estudos incidentes sobre cavidades de perfil circular, sejam elas poços, galerias, túneis ou furos. Além disso, ao contrário dos ensaios triaxiais convencionais em provetes cilíndricos, que recriam apenas um estado de tensão 2D, o ECO permite gerar um verdadeiro estado

triaxial de tensões (Dinis da Gama, 2011) já que recria uma terceira componente principal, tensão intermédia, cuja influência no processo de rotura da rocha é bem conhecida (Handin et al., 1967).

Por ser um ensaio verdadeiramente triaxial, tem um grande potencial para ser usado como um modelo, à escala laboratorial, para reproduzir uma ampla gama de condições, que conduzem a rocha à rotura, possibilitando a investigação de qualquer estado de tensões “in situ” (Sharma & Saxena, 2002). Ao fazer variar as tensões de confinamento, tanto externas como internas, é possível recriar não só um estado triaxial de tensões, como estudar variadas situações e estados de tensão nas paredes do furo (Fjær et al., 2008).

1.2 Emissões Acústicas

No estudo dos mecanismos e processos de fraturação é essencial ter métodos que permitam avaliar e registar esses mesmos processos. Dado o facto do ECO recorrer à célula triaxial de Hoek para exercer as tensões de confinamento, é impossível analisar visualmente o progresso das fraturas, estando essa análise limitada ao perfil final da rotura do provete.

O recurso ao registo das emissões acústicas é um método que permite analisar o processo de fraturação passo a passo.

Outros métodos como raio-X e tomografia (TAC) são também utilizados em trabalhos laboratoriais. Enquanto o raio-X e a tomografia permitem visualizar em tempo real a fraturação, os dados das EA necessitam de um tratamento posterior, o que faz deste um método de visualização indireta.

Embora a análise e registo de raio-X e tomografia seja uma ferramenta muito potente para estudar os processos de fraturação, os equipamentos necessários têm custos muito elevados e a sua utilização em trabalhos de campo acaba por não ser prática, motivo pelo qual são mais usados em trabalhos laboratoriais em conjunto com outras técnicas. Além disso, ambas as técnicas possibilitam apenas a captura de momentos estáticos no tempo, não possibilitando uma frequência de monitorização ao longo dos ensaios suficientemente grande para poder ser aproximada a uma monitorização contínua. Já os sistemas de monitorização de EA funcionam hoje em dia com frequências de monitorização na ordem dos 5 a 10 MHz.

1.2.1 Introdução Histórica

De acordo com Hardy (Hardy, 2005) o estudo das emissões acústicas em material geológico, também denominada micro sísmica, (EA/MS), teve o seu início em estudos levados a cabo pela dupla de investigadores L. Obert e W. I. Duvall, no final da década de 1930 (Obert, 1977). Segundo Drouillard (T. F. Drouillard, 1990), o primeiro e mais antigo artigo publicado referente a uma experiência científica com EA terá sido publicado em 1934, nos proceedings de um encontro *do Earthquake Research Institute* na Universidade de Tóquio (Imperial University of Tokyo). A experiência foi apresentada no mesmo

encontro por F. Kishinoue a 21 de Novembro de 1933. Esta terá sido levada a cabo sobre um espécimen de madeira sujeito a um momento fletor. Mais tarde, o artigo original foi traduzido para inglês por K. Ono e publicado no *Journal of Acoustic Emission* (Kishinoue, 1990).

Segundo Masayasu Ohtsu (Grosse & Ohtsu, 2008), o início do estudo das emissões acústicas na metalurgia terá sido na Alemanha pela autoria de F. Förster, que constrói um sistema para transformar as vibrações mecânicas da emissão acústica em voltagens elétricas (Förster & Scheil, 1936).

Uma década mais tarde, Joseph Kaiser introduz o estudo das emissões acústicas na engenharia de materiais (Hardy, 2005). A sua investigação conduziu à descoberta do denominado efeito de Kaiser, que consiste na ausência de EA em materiais previamente sujeitos a tensões, até que o valor destas seja novamente atingido. Este fenómeno é também observado em materiais naturais. B.H. Schofield reexamina o trabalho de Kaiser e publica o seu trabalho, nos EUA, com o título "*Acoustic Emission*" (Schofield, 1961). Segundo Ohtsu este artigo terá sido o primeiro a cunhar a terminologia EA na história (Grosse & Ohtsu, 2008).

Na sequência do trabalho de Schofield, os investigadores A. T. Green e H. L. Dunegan destacam-se na área das EA, ao contribuírem significativamente para o estabelecimento de procedimentos standard e aparelhos para a captação de emissões acústicas (T. Drouillard, 1996).

Realizando experiências em betão sujeito uma carga compressiva, Ruesch em 1959, descobre que o efeito de Kaiser é observável até à volta dos 75% da carga máxima até à rotura. No seu trabalho, Ruesch relata ainda que o comportamento da geração de emissões acústicas está intimamente relacionado com a variação volumétrica e a absorção de ondas ultrassónicas (Grosse & Ohtsu, 2008). Um ano mais tarde, L'Hermite descreve a relação entre diminuição da velocidade das ondas sísmicas, aumento do coeficiente de Poisson e geração de emissões acústicas acima do patamar de 75% da carga máxima até à rotura (L'Hermite, 1960).

Nos EUA, em 1967, J. C. Spanner cria o *Acoustic Emission Working Group* (AEWG). Desde a sua fundação o AEWG tem continuamente promovido conferências, tendo sido realizada a 56ª edição entre 17 e 19 de Junho de 2014, em Salt Lake City, no Utah (EUA). Após os contributos de Green e Dunegan, H. R. Hardy organiza uma série de cinco conferências intituladas *Conferences on Acoustic Emission/Microseismic Activity in geologic Structures and Materials*, que tiveram lugar em 1974, 1978, 1981, 1985 e 1991. Estas conferências constituíram um contributo importante no desenvolvimento de standards e técnicas no campo das emissões acústicas.

O *Japanese Committee on Acoustic Emission* foi fundado em 1969 e posteriormente reorganizado num comité técnico *ad hoc* e integrado na *Japanese Society for Nondestructive Inspection* (JSNDI). Ainda no Japão, o primeiro Simpósio Internacional de Emissões Acústicas (IAES) foi realizado em 1972, e desde então tem vindo a ter lugar bianualmente, tendo sido realizada a 21ª edição em Okinawa, Japão, em Novembro de 2012.

Também na Europa, foi criado em 1972 um grupo de trabalho para o estudo das EA, o *European Working Group on Acoustic Emission* (EWGAE). O EWGAE tem promovido uma série de conferências denominadas *European Conference on Acoustic Emission*, cuja 30ª edição teve lugar em Granada, Espanha em Setembro de 2012.

1.2.2 Origem das emissões acústicas em rochas sujeitas a tensões de confinamento

O mecanismo de origem das emissões acústicas em rochas, embora tenha sido alvo de bastantes estudos, não é ainda inteiramente compreendido. Todavia, aparenta estar relacionado com os processos de deformação e rotura dos materiais geológicos e com a consequente libertação súbita de energia de deformação elástica (Hardy, 2005). Assume-se que a súbita libertação de energia elástica com origem na nucleação de uma fratura/microfratura se propaga sob a forma de uma onda elástica. Colocando um transdutor na superfície do material é possível registar a onda.

1.2.3 Onda de emissão acústica – onda elástica

Embora sejam referidas como emissões acústicas, os fenómenos de EA não são exclusivamente ondas sónicas. As frequências registadas podem cobrir a passagem da gama inaudível para a audível, ou podem até mesmo passar para lá da gama audível sob a forma de ondas ultrassónicas. Por este motivo as emissões acústicas não podem ser definidas nem como acústicas nem como ultrassónicas e é apenas devido ao enquadramento histórico do estudo das emissões acústicas que esta nomenclatura se mantém. Em rigor, para o caso das emissões com origem em fraturas, os fenómenos de EA são ondas elásticas devido ao deslocamento de descontinuidades e rotura de elementos num sólido. Como consequência disto, as ondas EA consistem essencialmente em ondas volumétricas (P) e ondas transversais (S) bem como refletidas, difratadas e guiadas como as ondas Lamb e outras planares (Grosse & Ohtsu, 2008).

1.2.4 Captura e registo de emissões acústicas em laboratório

Existem dois tipos de registo das EA, um baseado na captura contínua do sinal da onda onde os sensores capturam todo o perfil da onda elástica e onde o registo é referido como sinal acústico; outra, baseia-se num registo discreto referido como um evento acústico. Em ambos os casos, a onda elástica é capturada por transdutores piezoelétricos e convertida em sinal elétrico. O caráter da frequência de um evento de EA observável depende fundamentalmente das características da origem e da distância entre a mesma e o sensor. Em estudos de campo já foram registadas frequências abaixo de 1Hz; no entanto, em estudos laboratoriais os fenómenos têm tipicamente frequências que vão desde a ordem de 10^3 Hz até 10^5 Hz (Hardy, 2005).

No que toca à interpretação das frequências, é importante referir que na maioria dos casos um único evento de EA tem ambas as componentes, P e S, e que em alguns casos a distinção entre ambas não é trivial (Hardy, 2005). Também não é rara a observação de uma terceira componente devida a ondas de

superfície, isto deve-se ao facto de o transdutor estar tipicamente colocado numa superfície livre do material. Esta componente é importante uma vez que está intimamente associada com a vibração de ressonância dos sensores. Consequentemente a forma das ondas das EA e os seus parâmetros não estão totalmente associados com os mecanismos de geração dos mesmos. Mas são essencialmente responsáveis por qualquer efeito no caminho entre a origem e o sensor, tendo de ser tidos em conta na escolha do sensor e do material em que este é feito (Grosse & Ohtsu, 2008). Por exemplo, é importante ter em conta as frequências esperadas na escolha e dimensionamento dos sensores. Estas têm de estar fisicamente contidas na zona de propagação de onda no sensor. Na eventualidade da zona de propagação ser demasiado curta, geram-se ondas difratadas e dispersivas (Grosse & Ohtsu, 2008), que induzem erros consideráveis na posterior análise dos dados.

1.2.4.1 Sensores de emissões acústicas

Um artigo publicado por Mobley et al. (Mobley et al, 1987) descreve o equipamento necessário para o registo de emissões acústicas em estudos laboratoriais. Também Hardy em *Laboratory monitoring systems*, (Hardy, 2005), entra em considerável pormenor nas especificidades e particularidades dum sistema de registo de EA. Segundo Hardy, os eventos de EA provenientes de experiências laboratoriais têm as seguintes características que os distinguem de eventos capturados em trabalhos de campo:

- Frequências de sinal predominantemente na gama das altas frequências, tipicamente na ordem das centenas de kHz.
- Sinal de baixas amplitudes.
- Cadência de eventos muito alta.
- Complexidade assinalável do perfil do sinal devido à reflexão das ondas elásticas nas fronteiras do espécimen sob ensaio e à sua geometria particular.

Segundo Hardy, estas características representam grandes condicionantes no que respeita ao dimensionamento e escolha dos sensores a utilizar (Hardy, 2005).

Dado que as dimensões dos espécimens laboratoriais estão tipicamente limitadas entre alguns cm e 2 m, a energia disponível para a maioria dos eventos será pequena, tenham estes origem em roturas inter ou intra grãos, coalescência de fraturas ou propagação de micro e macro fraturas. Disto resulta que a frequência do sinal de cada evento seja alta e com uma amplitude baixa. Todavia, uma vez que a distância entre a origem do evento e o sensor também é pequena, os fenómenos de atenuação da amplitude são também reduzidos, o que acaba por produzir um elevado número de eventos detetados.

Ao problema da complexidade das fronteiras do espécimen que introduz reflexões que podem ter tanto um cariz construtivo como destrutivo nas ondas elásticas, Hardy acrescenta a importância da heterogeneidade em materiais geológicos, que pode gerar fenómenos de refração e reflexão interna, produzindo padrões ainda mais complexos no sinal. Todavia, a respeito disto, Ohtsu afirma que no

campo da elástodinâmica as propriedades do material são fundamentalmente dependentes da dimensão característica dos seus constituintes, pelo que é razoável considerar-se rocha como um material homogéneo no que respeita a medições acústicas. Ohtsu justifica este facto com a disparidade entre as dimensões características da heterogeneidade (dimensão do grão ou das micro fraturas pré existentes) e a dimensão do comprimento de onda das EA, tornando qualquer efeito da heterogeneidade dos materiais inconsequente na medição das EA (Grosse & Ohtsu, 2008).

No caso de espécimens complexos, tipicamente sequências de unidades geológicas diferentes como as usadas na simulação de reservatórios complexos, o interface entre as unidades deve ser tido em conta, pelo que nem sempre esta simplificação é possível.

1.2.4.1.1 Materiais piezoelétricos para sensores de EA

Existem diversos materiais com propriedades piezoelétricas adequadas para a manufatura de sensores piezoelétricos. Embora existam mono cristais naturais como o fosfato de gálio, o quartzo ou a turmalina, são os elementos piezocerâmicos os mais utilizados na maioria das aplicações, por oferecerem maior durabilidade e sensibilidade. São exemplos mais comuns o titanato de bário e o titanato zirconato de chumbo (Hardy, 2005). Existem também mono cristais sintéticos de que é exemplo o niobato de magnésio e chumbo – titanato de chumbo (PMN-PT) que oferece uma sensibilidade superior à das ligas piezocerâmicas. Todavia são também mais sensíveis à temperatura, tendo um comportamento menos preciso em condições de temperatura elevadas, além do que são significativamente mais caros.

Para utilização em trabalhos laboratoriais existem essencialmente quatro tipos de transdutores piezoelétricos, respetivamente denominados *acelerómetros*, *transdutores EA*, *elementos piezoelétricos* e *extensómetros semicondutores* (Hardy, 2005):

1.2.4.1.1.1 Acelerómetros

Até à década de 80 do século XX, grande parte dos estudos laboratoriais de emissões acústicas focaram-se em sinais com relativa baixa frequência ($f < 20$ kHz) tendo sido utilizados acelerómetros convencionais como transdutores de EA. Para frequências mais baixas que a frequência de ressonância do sensor, o sinal voltaico gerado pelos elementos piezoelétricos é diretamente proporcional à aceleração a que o sensor é sujeito quando atingido pela onda elástica. Contudo, segundo Hardy, a sensibilidade deste tipo de sensores decresce rapidamente com o aumento do limite máximo na frequência operacional (Hardy, 2005). Referindo-se a vários modelos comercialmente disponíveis, Hardy, afirma ainda que são poucos os sensores que conseguem operar a frequências maiores do que 50 kHz (como o exemplo da Figura 1, sensível na gama de frequências entre 0.3 Hz e 30 kHz), sendo o limite superior da gama de sensibilidade destes sensores de apenas 100 kHz. Assim, Hardy conclui que

estes transdutores produzem excelentes resultados em estudos laboratoriais onde o foco é dado a sinais de baixa frequência, como de resto o foram no passado em estudos como os de Chugh (Chugh, 1968) e Kim (Kim, 1971). Todavia não são indicados para captar a maioria da gama normal em que as emissões acústicas ocorrem (entre os 20 kHz e os 500 kHz).



Figura 1 – Acelerómetro piezoeléctrico. Modelo KS91B da Manfred Weber - Metra Mess- und Frequenztechnik, Alemanha.

1.2.4.1.1.2 Transdutores EA

De acordo com Hardy os transdutores EA são sensores comercialmente mais comuns para emissões acústicas, (Figura 2). A frequência indicada na superfície do invólucro é apenas a do sinal emitido pelo sensor para efeitos de calibração, não indica nenhum extremo do intervalo de sensibilidades. Consistem num único disco piezoeléctrico, regra geral em PZT, isto é, um elemento piezocerâmico, acoplado a um disco metálico, tipicamente de latão (Hardy, 2005). Este último, por sua vez, é fixo à superfície do espécimen, pelo que o princípio de deteção é exclusivamente baseado no efeito piezoeléctrico do disco (Grosse & Ohtsu, 2008). O disco piezoeléctrico deve ser coberto com um material que o amorteeça (Hardy, 2005) por forma a atenuar o efeito que o prolongamento das vibrações causadas por um impulso elástico têm nas vibrações causadas pelo impulso seguinte. Todo o conjunto deve ser enclausurado dentro de um invólucro protetor (Beattie, 1983). Para permitir um acoplamento eficaz do sensor com o espécimen é tipicamente aplicado um meio de propagação que ajuda à propagação das ondas elásticas da superfície do espécimen para o sensor. A aplicação deste meio deve ser cuidada por forma a evitar bolhas de ar que servem do bloqueio à propagação da onda.



Figura 2 – Transdutor EA.

Quando a onda elástica chega ao disco piezoelétrico induz uma onda compressiva que por sua vez gera um impulso elétrico equivalente. Uma vez que os sensores deste tipo são apenas levemente amortecidos, têm um comportamento altamente sensível à ressonância (Hardy, 2005). De facto, a maioria dos sensores de EA são usados em modo de ressonância por forma a ganharem sensibilidade.

1.2.4.1.1.3 Elementos Piezoelétricos

Em algumas situações, tais como quando existe uma restrição no espaço disponível para a colocação dos transdutores, torna-se conveniente acoplar o elemento piezoelétrico diretamente à superfície do espécimen (Hardy, 2005). Estes sensores podem ter forma de disco ou de barra, sendo tanto a superfície superior como a inferior, que contacta com a superfície do espécimen, superfícies condutoras. Para fixar este tipo de sensores ao espécimen é normalmente utilizada uma cola epoxy condutora (Hardy, 2005).

1.2.4.1.1.4 Extensómetros Semicondutores

Este tipo de sensor tem por princípio operacional uma alteração da resistência à passagem de corrente elétrica como resposta a uma deformação superficial. Segundo Hardy, a relação entre a alteração da resistência e a deformação é descrita pela equação:

$$\Delta R = (RG)e \quad [01]$$

Onde ΔR é a alteração da resistência à passagem de corrente devido à deformação e , R a resistência nominal do extensómetro e G o factor de calibração do extensómetro (Hardy, 2005).

Obviamente este tipo de sensor apresenta diversas vantagens em relação a outros. Desde logo as dimensões e espessura reduzidas permitem a utilização de vários sensores numa pequena área onde seria impossível colocar outro tipo. Por exemplo, no caso de um ECO, ou triaxial, em que o espécimen está encamisado, a utilização de extensómetros supercondutores permite a instrumentação do ensaio sem ser necessário adaptar a camisa de confinamento para albergar os transdutores. Outra vantagem é a direcionalidade, uma vez que o extensómetro monitoriza a deformação paralela ao seu eixo longitudinal.

Contudo este tipo de sensor tem uma séria desvantagem relativamente a outros sensores mais usados, como os transdutores EA e os elementos piezoelétricos: uma sensibilidade francamente inferior. Tal deve-se ao facto da sensibilidade do extensómetro supercondutor depender do fator de calibração cujos valores standard variam entre os 1.5 e os 3.5, sendo o valor mais comum 2.0. É possível capturar as EA com recurso a estes extensómetros standard desde que a onda de tensão superficial correspondente tenha uma amplitude suficientemente elevada, maior do que 10^{-6} . No entanto, este não é o caso na

maior parte das emissões acústicas observáveis em ensaios laboratoriais em rocha, onde as deformações associadas às emissões apresentam magnitudes desde 10^{-8} - 10^{-10} , nalguns casos inferiores a isso.

Os extensómetros supercondutores especiais com fatores de calibração da ordem dos 10^2 podem ser utilizados satisfatoriamente como transdutores de emissões acústicas (Kimble, 1984). Tendo por base o trabalho de Kimble, foram fabricados sensores com fatores de calibração de 115 que produzem resultados satisfatórios (Hardy, 2005). A maior dificuldade relativa ao uso deste tipo de sensores é o complicado dispositivo eletrónico necessário para transformar o output dos sensores em input de um sistema de monitorização de emissões acústicas convencional. Kimble descreve no seu trabalho este sistema indicando que com ele é possível detectar deformações da ordem de grandeza de 4×10^{-8} m (Kimble, 1984).

1.2.5 Medição de emissões acústicas em ensaios triaxiais

No caso de experiências com ensaios triaxiais, um artigo de Siskind descreve os problemas associados à medição indireta das emissões acústicas (Hardy, 2005). Como referido anteriormente, o interface entre materiais diferentes como o da rocha/metal acaba por produzir reflexões que conduzem a erros no registo das EA. Disto resulta a evidência de que, a tentativa de medir as emissões acústicas indiretamente, colocando sensores quer na superfície da célula de ensaio quer nos pistões de carga axial, produz um conjunto de ecos que complicam a utilização dos dados recolhidos, dada a geometria complexa do caminho que as ondas elásticas teriam de percorrer desde a origem até ao sensor. Assim Hardy aconselha o acoplamento dos transdutores diretamente ao espécimen (Hardy, 2005).

No passado, uma metodologia utilizada para ultrapassar esta condicionante foi a utilização de elementos piezoelétricos e extensómetros supercondutores, que em ambos os casos devido às dimensões reduzidas, podiam ser montados por baixo da manga de confinamento radial. Todavia o sistema que torna esta solução possível implica que as ligações elétricas aos sensores sejam feitas após a colocação do espécimen dentro da manga, o que significa um processo demorado em cada ensaio. Um método alternativo, mais expedito, é apresentado por Byerlee e Lockner, onde uma manga relativamente espessa é utilizada para transferir a tensão de confinamento radial (Byerlee & Lockner, 1977). Os discos metálicos dos transdutores EA são embutidos na própria manga e o interface entre estes e a manga, é vedado com uma cola epoxy. As ligações elétricas aos sensores são feitas através de cabos adequados para altas pressões conduzidos até uma das extremidades da célula triaxial. São conectados a um sistema de leitura de emissões acústicas convencional.

1.2.6 Localização de EA

Uma das vantagens mais evidentes da monitorização das emissões acústicas é a possibilidade de, tratando os dados recolhidos, através duma rede adequada de sensores, ser possível determinar à posteriori a origem da onda elástica, isto é, do evento de emissão acústica (Hardy, 2005). Existem duas abordagens comumente utilizadas, baseando-se a primeira na utilização de apenas uma única estação sismógrafo incorporando um transdutor triaxial; a segunda, predominantemente mais utilizada, tanto em trabalhos de campo como em laboratório (Hardy, 2005), baseia-se na utilização de uma rede composta por vários transdutores.

Sobre a localização da origem de eventos sísmicos foram já publicados diversos trabalhos ao longo de mais de cem anos, o que demonstra não só a importância deste problema mas também a sua complexidade (DONG & LI, 2012). Fruto não só de investigação aturada, mas também de desenvolvimento tecnológico, desenvolveram-se diversas metodologias para localização da origem das emissões acústicas: o método da Determinação do Hipocentro de Falha (*Joint Hypocenter Determination Method, JHDM*) (PAVLIS & BOOKER, 1983; PAVLIS, 1986), o método da Dupla Diferença (*Double Difference Method, DDM*) (WALDHAUSER & ELLSWORTH, 2000), o método da realocação do evento principal (*Master Event Relocation Method MERM*) (REYES-MONTES, RIETBROCK, COLLINS, & YOUNG, 2005) e a Inversão Topográfica (*Topographic Inverse*) (HUSEN, KISSLINGE, FLUEH, & ASCH, 1999).

O *JHDM* destaca-se pela particularidade de calcular a localização dum grande número de eventos simultaneamente, é particularmente indicado para casos em que existe uma grande concentração de eventos em simultâneo como na localização do hipocentro dum terremoto. *DDM* apoia-se na diferença de velocidades entre as ondas S e P. É indicado para a localização de eventos ocorridos a grandes distâncias e/ou ao longo destas. Para localizar os restantes eventos o *MERM* faz uso duma localização prévia dum dos eventos, evento mestre para localizar os restantes. Este método é mais indicado para a escala de campo e não de laboratório. A inversão topográfica utiliza a informação duma grande quantidade de estações sísmicas, para cada uma das quais são desenvolvidos corretores de erro baseados na velocidade das ondas sísmicas na sua vizinhança com o auxílio de detonações em profundidade. Esta é uma técnica utilizada apenas para grandes distâncias.

Uma outra técnica analítica muito utilizada é a Diferença de Tempos de Trajetória (*Travel-time-difference, TTD*) que remete o problema da localização para a resolução da Equação 2 (Hardy, 2005):

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = V_i^2(t_i - T_s)^2 \quad [02]$$

Onde x_i , y_i , z_i e t_i são respectivamente as coordenadas cartesianas conhecidas do sensor de índice i e o momento em que o evento foi registado nesse sensor. As componentes desconhecidas x_s , y_s , z_s e T_s são referentes à origem da emissão acústica. Posto isto temos uma equação com quatro incógnitas, o que implica que para que a solução do sistema seja exatamente determinada no espaço, seja necessária informação de quatro transdutores. Todavia, segundo Hardy, existem erros inerentes à

determinação da posição dos sensores, determinação do momento de registo do evento no sensor e da velocidade sísmica da onda acústica no meio. Por isso, um mínimo de cinco sensores deve ser utilizado, forçando a que a solução do sistema seja sobre determinada (Hardy, 2005). O uso de mais sensores transdutores do que os parâmetros desconhecidos possibilita o emprego de métodos estatísticos, nomeadamente o método dos mínimos quadrados onde um processo iterativo da minimização dos tempos conduz geralmente a uma diminuição do erro na localização (Grosse & Ohtsu, 2008). Este método assume que o meio de propagação é homogéneo, isto é, que não existem heterogeneidades que provoquem refrações das ondas forçando-as a percursos complexos até à chegada ao sensor. Outra assunção é a de que existe um caminho de propagação direto entre a origem da onda elástica e o transdutor. Ou seja, o método parte do princípio que as ondas se deslocam em linha recta desde a origem até ao sensor, o que nem sempre é verdade, particularmente em espécimens de rocha, por natureza heterogéneos. Todavia, como referido anteriormente para os comprimentos de onda associados às emissões acústicas em laboratório a escala das heterogeneidades da amostra acaba por ser irrelevante, podendo este ser comparado a um meio homogéneo. Além disso, em laboratório é por vezes conveniente utilizar espécimens com geometrias complexas, como é o caso dos ensaios em cilindros ocos; esta geometria complexa das fronteiras da amostra impossibilita que exista, para alguns pontos da mesma, um caminho reto contínuo entre a origem e o sensor. Nestes casos de geometria complexa existem duas abordagens possíveis que possibilitam a resolução do problema da localização da origem das emissões acústicas (Kundu, 2014).

A primeira resolve o problema recorrendo a uma malha densa de sensores, dimensionada por forma a que, para qualquer ponto em que possa ter origem uma emissão acústica, existam suficientes sensores para que o sistema de equações da localização possa ser resolvido. Tal abordagem implica que seja fisicamente possível instalar tal densidade de sensores na superfície do espécimen; a verificação desta condição é muito difícil, sobretudo quando se lida com amostras de pequenas dimensões, como é o caso das usadas em laboratório; a utilização de extensómetros supercondutores de alto fator de calibração pode em parte solucionar o problema de espaço, todavia implica a abdicação da informação referente a muitas emissões acústicas de frequência maior (limitação deste tipo de sensores). A outra abordagem, mais trabalhosa e computacionalmente mais exigente, foi proposta por Ing et al. e Ribay et al. (Ing, Quieffin, Catheline, & Fink, 2005; Ribay et al., 2007) e exige a modelação de uma rede neuronal artificial ou técnica de inversão temporal baseada na função de resposta ao impulso elástico.

De acordo com Kundu, o método baseia-se na construção de uma matriz de treino que se obtém através da solicitação pontual da superfície do espécimen ao longo duma malha de pontos bem definidos no espaço. A função de resposta ao impulso elástico é registada para cada ponto da malha em cada um dos sensores, obtendo-se assim um modelo virtual de velocidades discriminado para cada uma das zonas do espécimen definidas pela malha para cada um dos sensores. Quando se origina uma emissão acústica no espécimen que se pretende localizar, é necessário comparar o registo do evento em cada sensor e comparar com as funções de resposta ao impulso na malha, escolhendo-se aquela que apresenta maior correlação com a da matriz de treino (Kundu, 2014).

Abordagens semelhantes utilizando a inversão da função de resposta ao impulso evitando a análise da mecânica das ondas foram propostas por vários autores, (Grabec & Sachse, 1989; Kosel, Grabec, &

Muzic, 2000; Sribar & Sachse, 1993). Estes autores empregam uma rede neuronal artificial, bem como técnicas de reconhecimento de padrões por forma a resolver o problema de inversão. A vantagem destas técnicas é que dispensam o conhecimento prévio da velocidade das ondas elásticas ou dos contornos geométricos da superfície do espécimen, possibilitando além da localização da origem do evento, estimar a energia da mesma (Kundu, 2014). São técnicas que no entanto são computacionalmente exigentes e requerem muito trabalho de preparação. A construção da matriz de treino exige a repetição dos testes em cada ponto da malha várias vezes, o que em espécimens de grandes dimensões pode levar muito tempo.

Segundo Kundu, é este o motivo pelo qual Park et al. tornaram a técnica mais expedita ao automatizar o processo de construção da matriz de treino utilizando para o efeito um *scanning laser Doppler vibrometer* (SLDV), (Kundu, 2014), capaz de medir velocidades de propagação baseado no princípio do efeito de Doppler (Scruby & Drain, 1990; Staszewski, Lee, Mallet, & Scarpa, 2004). Em princípio esta técnica possibilita a localização da origem de emissões acústicas em qualquer estrutura independentemente da complexidade geométrica desta (Park et al., 2012). Todavia até ao momento a complexidade das estruturas em que a técnica foi testada é ainda limitada (Kundu, 2014).

O problema de localização da origem de emissões acústicas em espécimens contendo cavidades internas de perfil circular foi abordado por Baxter et al.. É proposta uma metodologia denominada “Delta T” para a localização dos eventos (Baxter, Pullin, Holford, & Evans, 2007). Este método baseia-se numa bateria de eventos de teste artificialmente gerados através do teste *Hsu-Nielsen pencil lead break* (Hsu, 1977). Em cada ponto da matriz de teste são gerados dez eventos artificiais. A média dos dez tempos é registada em cada um dos sensores para cada ponto. Usando interpolação linear entre os pontos da matriz de teste, constrói-se um mapa das diferenças de tempo expectáveis para cada ponto do espécimen. Hensman et al. melhoram significativamente esta técnica ao introduzirem interpretação probabilística, o que reduz a quantidade de testes de treino (Hensman, Mills, Pierce, Worden, & Eaton, 2010).

2 Procedimento experimental

Os ensaios realizados e o seu procedimento laboratorial foram desenhados especificamente para este trabalho. Assim foi necessário adaptar o equipamento já existente, bem como desenvolver toda a metodologia de preparação das amostras e montagem do ensaio. Neste capítulo descrevem-se os equipamentos utilizados, as adaptações necessárias, a montagem e a preparação das amostras.

2.1 Material Ensaiado

Neste trabalho foi ensaiado um material carbonatado da unidade Calcários de Codaçal que foi cedido pela empresa Pedramoca. Estes calcários designam-se comercialmente por Semi-rijo do Codaçal ou Rosal correspondendo a um *grainstone* oobioclásticos pelóidicos com cor creme bastante clara e laminações sedimentares pouco vincadas (Narciso, 2015). Este material foi escolhido pela sua homogeneidade à escala do bloco.

2.2 Equipamento Utilizado

O equipamento necessário para a realização do ensaio é possível ser classificado em dois grupos funcionais. O primeiro grupo, aqui denominado grupo mecânico, é composto por uma célula triaxial de Hoek modificada, por uma prensa hidráulica, uma célula de carga e por dois macacos hidráulicos. O segundo grupo, aqui denominado grupo de dados, é composto por quatro sensores piezoelétricos, quatro pré-amplificadores, um amplificador/filtro, um computador e um software de recolha de dados. A ligação entre estes dois grupos é descrita em seguida.

2.2.1 Grupo Mecânico

2.2.1.1 Célula de Hoek modificada

A célula de Hoek, utilizada para a realização de ensaios triaxiais convencionais é composta por seis componentes: o corpo principal em aço (Figura 3), onde se encontram inseridas as válvulas para a injeção do óleo hidráulico e purga do ar. O corpo da célula triaxial de Hoek pode ser grosseiramente

descrito como um cilindro oco de paredes grossas. Com 100 mm de diâmetro, cerca de 24 mm de espessura e 120 mm de altura.



Figura 3 – Corpo da célula triaxial de Hoek.

A parede interna da câmara de pressão do óleo hidráulico é composta por uma camisa impermeável em resina maleável, que separa o óleo da superfície do provete. Esta permite que a pressão do óleo transmita uma tensão de confinamento radial ao provete sem que o mesmo esteja em contacto com o óleo. A célula é fechada nas extremidades superior e inferior por tampas roscadas em aço, (Figura 4) que fixam a camisa ao corpo principal, impedindo fugas de óleo pelas extremidades por deformação da camisa. As tampas são abertas permitindo a inserção do provete a ensaiar no seu interior, bem como a passagem dos êmbolos de carga para transmissão da tensão axial. São estes êmbolos que fecham o conjunto transmitindo a tensão da prensa ao provete confinado.



Figura 4 – Tampas da célula triaxial de Hoek.

As adaptações à célula de Hoek necessárias à realização deste ensaio são mínimas, no sentido em que a modificação recai apenas sobre a camisa e os êmbolos. Assim evita-se que todo o equipamento seja permanentemente afecto exclusivamente a este tipo de ensaio, em particular evita-se alterar o corpo da célula, que se caracteriza por ser uma peça de dimensões e características standard para a realização de ensaios triaxiais normalizados. Na Figura 5 apresenta-se a Célula de Hoek modificada e instrumentada, permitindo facilmente perceber as alterações realizadas e abaixo descritas.

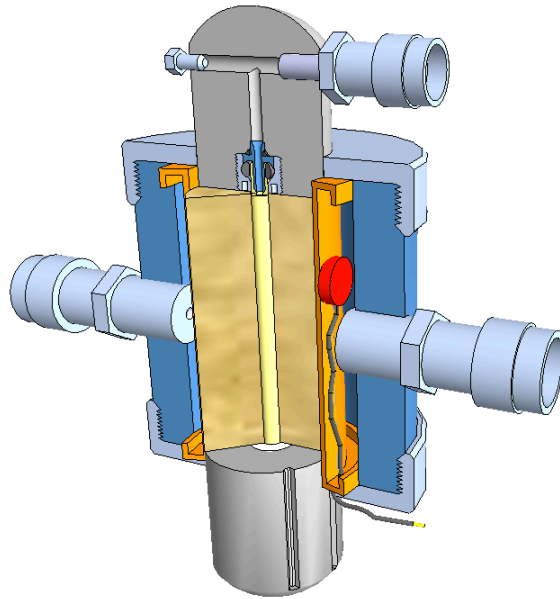


Figura 5 - Representação da Célula de Hoek modificada e instrumentada.

A primeira alteração consiste no corte de quatro aberturas circulares na superfície da camisa onde foram acondicionados quatro sensores piezoelétricos. A localização dos centros destas aberturas, relativamente a um provete centrado dentro da camisa, pode ser consultadas na Tabela 1, cujas coordenadas têm origem na extremidade superior e no centro do provete e estão na forma descrita na Figura 25.

Sensor	ρ [mm]	θ	Z[mm]
1	21	70°	-25
2	21	250°	-25
3	21	160°	-59
4	21	340°	-59

Tabela 1 – Coordenadas dos sensores.

O espaçamento entre os sensores e o limite das aberturas é selado com uma resina impermeável e os sensores cobertos com uma tampa plástica e a mesma resina (Figura 6). Os cabos coaxiais com $\varnothing = 3,5$ mm para recuperação da informação dos sensores foram fixos à parede exterior da camisa.

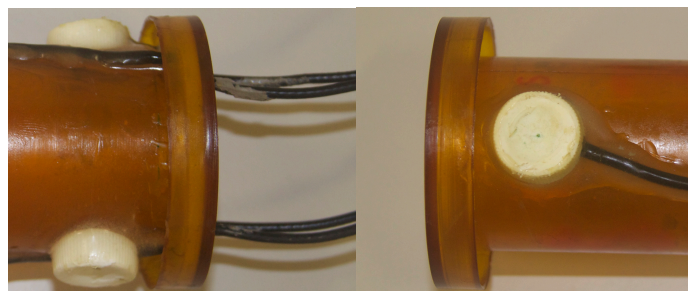


Figura 6 – Sensores acondicionados na camisa e cabos fixos às paredes.

Os cabos passam para o exterior da câmara de pressão do óleo hidráulico através de quatro furos, denominados de passagem, situados na base inferior da camisa (Figura 7) e impermeabilizados com resina. A estabilidade da pressão de confinamento é essencial para a boa condução do ensaio, no decorrer da fase de afinamento do ensaio verificou-se uma fuga de óleo hidráulico, durante o processo de carga da pressão, através do interior dos cabos coaxiais. Afim de impedir, ou no mínimo limitar, as fugas de óleo hidráulico pelo interior dos cabos estes foram descarnados num troço com cerca de 20 mm, junto aos furos da base da camisa, e emersos em resina para que esta impregnasse o interior da camisa dos cabos, bloqueando assim a passagem do óleo hidráulico.



Figura 7 - Inserção dos cabos coaxiais na base da camisa da célula de Hoek.

O embolo inferior, originalmente justo à camisa e de perímetro circular por forma a garantir uma distribuição da transmissão da carga axial ao provete, o mais homogénea possível, tinha o inconveniente de esmagar e cortar os cabos coaxiais. Por este motivo a peça foi levada a uma fresa onde foram abertos quatro rasgos de 4 mm de largura e 4 mm de profundidade no embolo (Figura 8), que coincidem com as saídas dos cabos coaxiais (Figura 7).

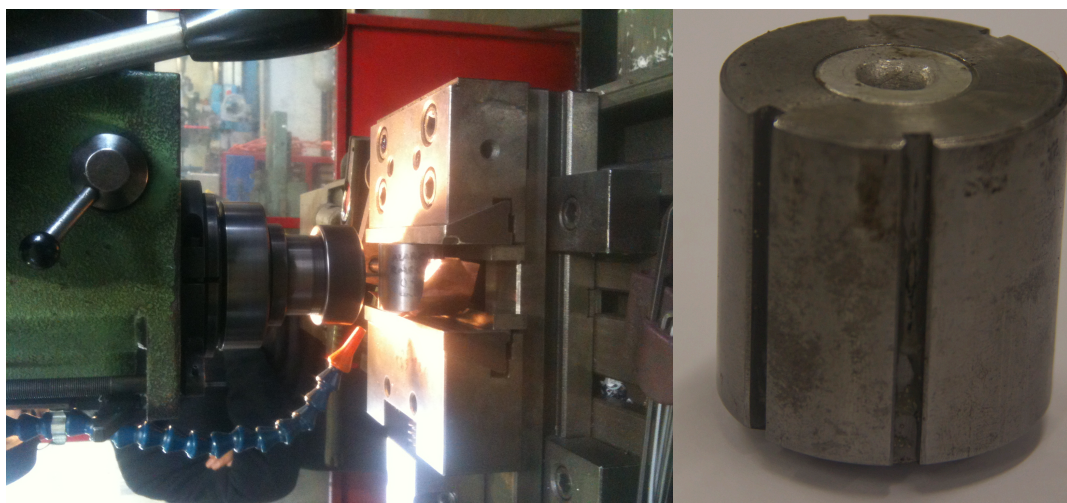


Figura 8 – Adaptação do embolo inferior.

O embolo superior (Figura 9) está adaptado para injeção de óleo no centro da base do mesmo. O óleo é injetado numa mangueira de látex. O interface embolo-mangueira é isolado por meio de um conjunto de cinco componentes:

- Uma agulha de injeção;
- Um O'ring fino para selar o interface agulha embolo;
- Uma membrana de borracha para proteger o O'ring fino;
- Um O'ring grosso, cuja função é selar por atrito a interface agulha-mangueira;
- Uma tampa roscada que rosca numa rosca aberta na base do embolo e que compacta os restantes componentes garantindo assim a estanquicidade.

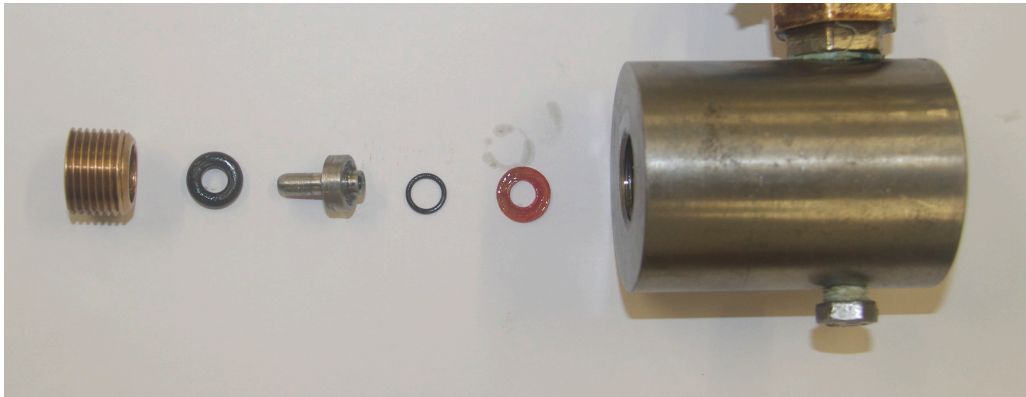


Figura 9 - Embolo superior.

2.2.1.2 Prensa Hidráulica e célula de carga

Para o confinamento axial é utilizada uma prensa hidráulica (Figura 10 A) com uma célula de carga (Figura 10 B). Esta opção tem duas razões de ser. A primeira é que a célula de carga emite muito menos vibrações ao longo do carregamento do que aquelas que seriam emitidas por uma prensa hidráulica normal, a segunda razão é pelo facto de a célula de carga permitir um maior controlo da carga axial transmitida ao espécimen, podendo assim garantir-se a manutenção da carga.

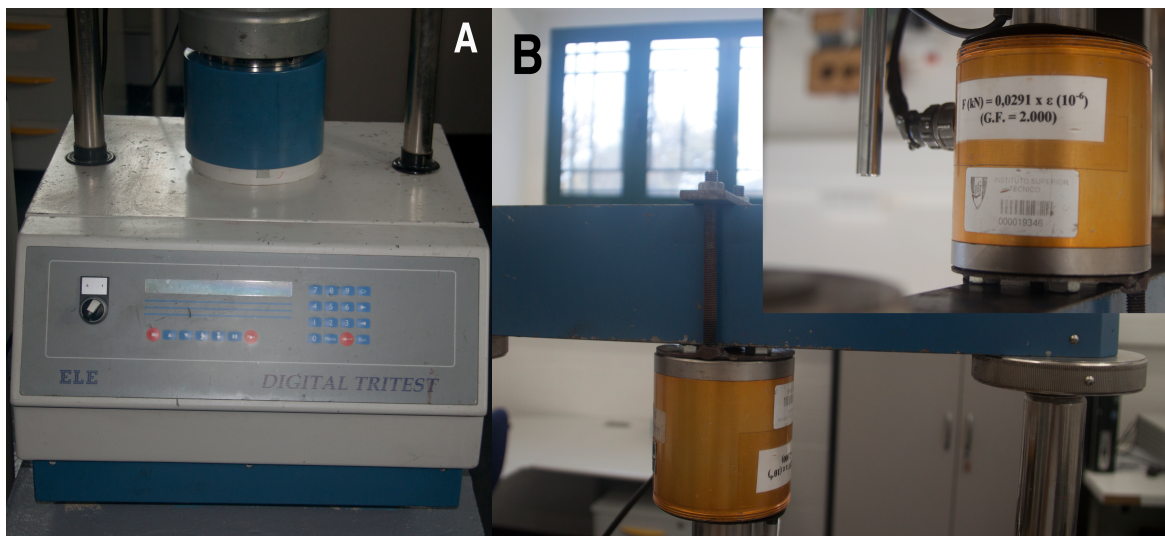


Figura 10 - Prensa Hidráulica e Célula de carga.

2.2.1.3 Macacos Hidráulicos

O confinamento radial e a tensão interna são exercidos por meio de dois macacos hidráulicos (Figura 11) manuais capazes de exercer pressões máximas na ordem dos 70 MPa. O primeiro macaco (Figura 11 à esquerda) é utilizado para exercer a pressão de confinamento radial. O outro (Figura 11 à direita) é utilizado para levar o espécimen à rotura por tração injetando óleo hidráulico na manga interna.



Figura 11–Macacos Hidráulicos.

2.2.2 Grupo de Aquisição de Dados

O Grupo de Aquisição de Dados está ligado conforme indicado na Figura 12. Os sensores captam deformações mecânicas e transformam-nas em impulsos elétricos que são enviados para o computador onde um software trata e guarda a informação. Antes de entrar no computador o sinal passa por um sistema em série composto por um pré amplificador e por um amplificador.

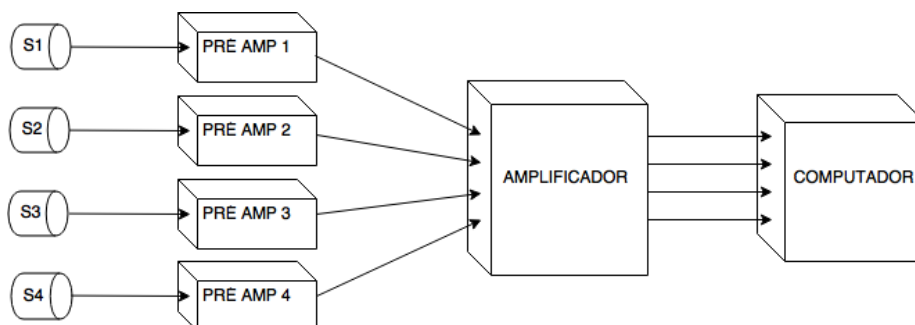


Figura 12 - Esquema do encadeamento do sinal recolhido pelos sensores.

2.2.2.2 Sensores Piezoelétricos

Os sensores montados na camisa da célula de Hoek são sensores piezoelétricos para ondas P. São compostos por uma placa de cerâmica perovskito, de uma liga de titanato zirconato de chumbo (Figura 13), cujas propriedades piezoelétricas mensuráveis, permitem transformar deformações mecânicas em impulsos elétricos. Esta placa está acoplada a uma placa cilíndrica de uma liga de cobre e zinco (latão), com $\varnothing = 15$ mm. A superfície da base oposta à placa piezoelétrica foi torneada por forma a acoplar perfeitamente com a superfície do provete no interior da camisa.



Figura 13 – Elemento piezoelétrico.

O fio periférico do cabo coaxial foi soldado à placa de latão para passar o sinal terra. O fio central foi soldado com uma solda de prata à placa piezoelétrica.

O topo dos sensores foi protegido com uma tampa plástica e protegido com uma resina impermeável enrijecida (Figura 14), garantindo-se assim a estanquicidade do sensor e protegendo o mesmo da pressão do óleo no interior da célula de Hoek.

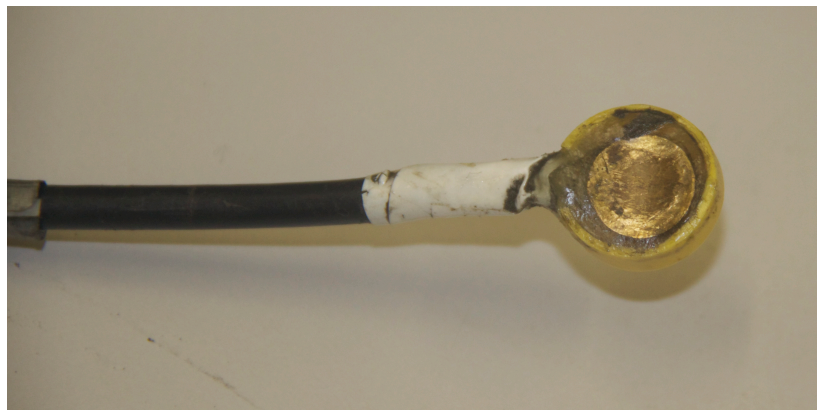


Figura 14 – Sensor Transdutor EA encapsulado.

2.2.2.3 Pré-Amplificadores

Os quatro pré-amplificadores utilizados (Figura 15), são do modelo PXPA1, produzido pela Peng Xiang Technology, China. Produzem um pré-ganho no sinal de 50 dBe operam com ~28 V DC, a corrente é fornecida pelo amplificador.



Figura 15 – Os 4 pré-amplificadores numerados de 1 a 4, identificando-os respectivamente com cada um dos sensores.

2.2.2.4 Amplificador

O sinal depois de amplificado no pré-amplificador é enviado para o Amplificador PXMA (Figura 16), este aparelho atua não só como amplificador, mas também como filtro de frequências. Produzido também pela Peng Xiang Technology o PXMA necessita de estar ligado a uma fonte de alimentação. O ganho é programável e pode ir desde x1 até x100 sendo também possível aplicar filtros passo-alto para permitir a recolha nas frequências pretendidas.

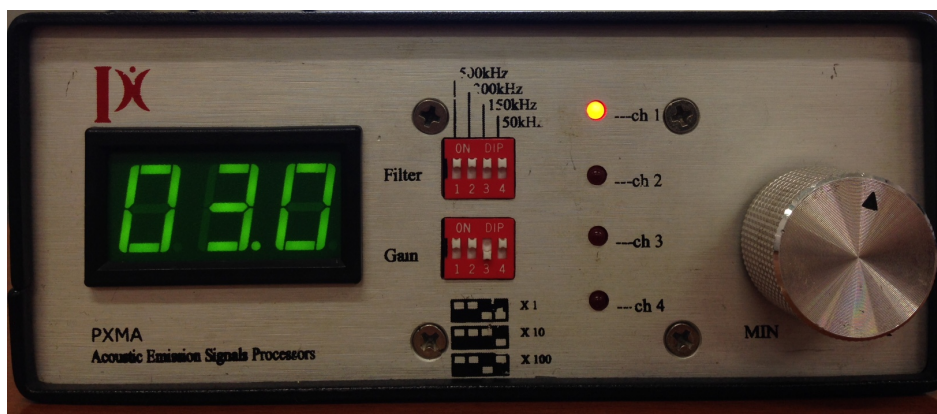


Figura 16 - Amplificador PXMA, processador de sinais de EA. A luz amarela no canal 1 é indicativo de que apenas o pré amplificador dedicado ao sensor 1 está conectado.

Neste caso, nenhum dos filtros (Figura 17) foi utilizado uma vez que o limite inferior dos filtros é demasiado elevado. De facto, como já referido, os eventos acústicos em ensaios laboratoriais têm tipicamente frequências entre os 10^3 Hz e os 10^5 Hz, com especial ênfase nas baixas frequências. Além do mais a gama de frequências ótimas para os sensores piezoeléctricos tem o seu limite superior nos 100 kHz pelo que não faria sentido filtrar os sinais com frequência inferior a 50 kHz.

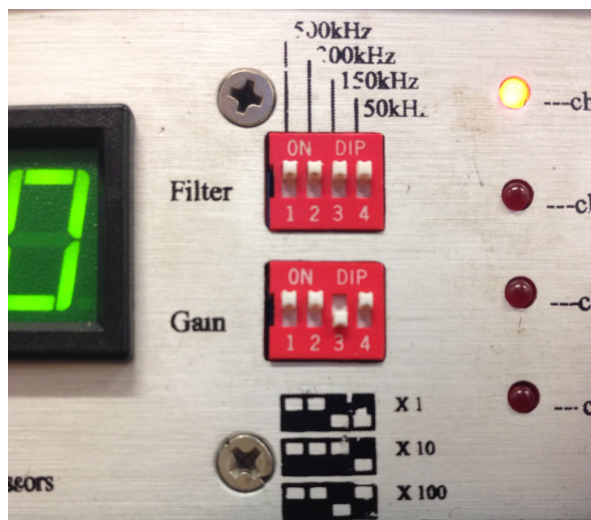


Figura 17 - Pormenor do controlo dos filtros passo-alto e do ganho no Amplificador PXMA.

2.2.2.5 Software de recolha de dados

O software de recolha de dados funciona em conjunto com uma drive que recebe os sinais do amplificador. Por limitações do hardware e software disponíveis utilizou-se um software que recolhe apenas informação estatística sobre o sinal e não o perfil completo do sinal. Os parâmetros recolhidos pelo software¹ são:

- A amplitude máxima do sinal em dB,
- O rácio de energia em mV/ms,
- O número de picos de onda,
- O número de picos de onda até ao pico de máxima amplitude,
- A duração do evento acústico em μ s,
- O tempo desde o início do evento até ao pico de amplitude máxima,
- O nível médio da amplitude do sinal (RSM) em dB,
- O nível aparente da amplitude do sinal na fonte de emissão em dB,

¹ Nota: O software tem ainda a opção de fazer a localização dos eventos, no entanto esta função é limitada para a geometria estudada apresentando uma precisão muito baixa.

- A energia do sinal em $\text{mV} \times \text{ms}$ e
- O instante de tempo em que o sinal foi detectado com precisão na casa dos ns.

2.3 Montagem do Ensaio

Descreve-se abaixo a preparação das amostras e montagem do ensaio.

2.3.1 Preparação dos provetes

Os blocos dos quais foram extraídos os provetes ensaiados foram previamente cortados em blocos aproximadamente cúbicos com aresta à volta de 30 cm. Os blocos foram levados a uma carotadora onde foi adaptada uma broca de ponta diamantada com 160 mm de comprimento e de $\varnothing = 4,5$ mm. Para cada provete efetuou-se um furo com aproximadamente 120 mm de profundidade e sem descentrar a carotadora trocou-se a broca para uma carotadora diamantada de $\varnothing_{\text{interno}} = 42$ mm. Depois de extraídos, os provetes foram levados a uma serra onde foram acertados os topos. Alguns provetes foram ainda levados a um torno mecânico para acertar defeitos na superfície e garantir a coaxialidade das superfícies cilíndricas.

As dimensões finais dos provetes são as que se mostram na Figura 18:

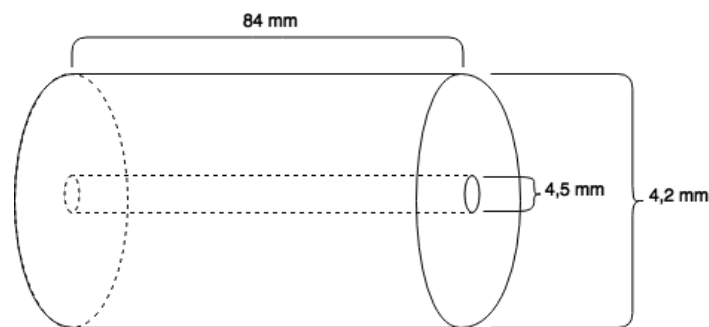


Figura 18 - Dimensões finais do provete para ensaio.

2.3.2 Tensão Radial Interna

A tensão radial interna é transmitida ao provete por meio de uma mangueira de látex. Para garantir que a matriz do provete não é atravessada por óleo utilizou-se uma mangueira de látex composta por duas camadas: uma camada interna é uma mangueira látex com $\varnothing_{\text{externo}} = 4,5$ mm e $\varnothing_{\text{interno}} = 3$ mm, e outra externa, também em látex, tem um $\varnothing_{\text{externo}} = 5$ mm e $\varnothing_{\text{interno}} = 3$ mm.

Para montar a mangueira é cortado um troço de camada interna com cerca de 140 mm de comprimento e um troço de camada externa com cerca de 100 mm comprimento. A camada interna é passada por dentro da camada externa com auxílio de uma sonda em arame (Figura 19). Uma das pontas da

mangueira, (A) tem as duas mangueiras à face, a outra ponta tem um excesso de 40 mm de camada interna. Na ponta (A) a mangueira é selada com um nó.



Figura 19 – Mangueiras introduzidas com sonda de arame.

A camada externa é puxada no sentido da ponta B por forma a garantir que a camada interna não escorrega para dentro da camada externa.

Neste ponto a mangueira é introduzida no centro do provete ficando o nó da ponta A na base inferior do provete. Marca-se com um marcador de acetato onde a mangueira fica à face com a base superior do provete. A mangueira é então puxada e fixa com um excesso com cerca de 40 mm de comprimento e é passada pela tampa roscada do embolo superior e pelo O'ring. A mangueira é cortada pela marca ficando as duas camadas à face e é inserido o pipo de injeção do óleo. A mangueira é então liberta e ao retrair fecha o conjunto, (Figura 20).



Figura 20 – Embolo superior – provete.

É então colocado um outro O'ring na base do injetor por forma a tornar o conjunto estanque quando este é fechado, impedindo que o óleo chegue ao provete até à rotura deste².

²Nota: O embolo inferior tem um orifício no centro para evitar que o nó na base do provete seja entalado prevenindo-se assim cortes prematuros na mangueira durante o ensaio

2.3.3 Tensão Axial

Com auxílio de um alicate de pontas adaptado para o efeito, o embolo superior é roscado na tampa agora conectada ao provete. É importante que seja o embolo a ser roscado no conjunto provete-mangueira-injector por forma a não torcer a mangueira nem criar atritos nas paredes internas do provete. O embolo inferior só é fixo ao conjunto após a inserção deste na célula de Hoek.

O conjunto provete-embolo superior é colocado em posição invertida numa plataforma que o mantém na vertical e facilita a inserção dentro da célula de Hoek.

2.3.4 Tensão de Confinamento (Radial Externa)

A célula de Hoek é montada com especial cuidado por forma a evitar danos nos sensores e nos cabos colocados na camisa. Uma vez colocada a camisa dentro do corpo principal da célula é enroscada a tampa superior da célula. O conjunto é então deslizado para cima do conjunto provete-embolo superior ficando todo o conjunto em posição invertida (Figura 21).



Figura 21 – Pormenor da montagem do ensaio.

Cuidadosamente os cabos que saem da base inferior da camisa são guiados para os rasgos no embolo inferior (Figura 8) e este é acoplado à base inferior do provete. Uma banda de borracha é passada por

cima dos cabos protegendo estes da aresta cortante da tampa inferior da célula que é enroscada fechando o conjunto³.

2.4 Controle dos tempos máximos entre sensores e validação dos sensores.

Depois de purgados ambos os sistemas de óleo hidráulico os provetes são submetidos a um estado de tensão cuja componente de confinamento é igual à tensão axial. São então registados sequencialmente (Tabela 2), os seguintes tempos de viagem de um impulso sónico entre sensores:

1º	Sensor 1 – Sensor 2	2º	Sensor 2 – Sensor 1
3º	Sensor 2 – Sensor 3	4º	Sensor 3 – Sensor 2
5º	Sensor 3 – Sensor 4	6º	Sensor 4 – Sensor 3
7º	Sensor 4 – Sensor 2	8º	Sensor 2 – Sensor 4
9º	Sensor 1 – Sensor 4	10º	Sensor 4 – Sensor 1
11º	Sensor 1 – Sensor 3	12º	Sensor 3 – Sensor 1

Tabela 2 – Ordem pela qual foram testados os tempos de viagem de um impulso sónico entre sensores. Tempos diretos S_A-S_B e tempos “trocados” S_B-S_A .

Estes tempos são registados para cada espécimen em todos os níveis de carga até ao nível a que o espécimen é ensaiado. Assim ao passo que para os espécimens ensaiados a 1 MPa apenas são registados os tempos a esta carga, para os ensaios a 3 MPa foram registados os tempos a 1 MPa, 2 MPa e 3 MPa.

As propriedades piezoeléctricas dos sensores permitem a recepção de um impulso eléctrico no sensor que, é convertido num impulso mecânico, i.e. onda acústica. A onda acústica é detectada por um outro sensor que a transforma de volta em impulso eléctrico. O tempo de viagem nos cabos é desprezável e portanto o tempo que intermedeia entre o instante em que o impulso eléctrico é enviado para o primeiro sensor e o instante em que o impulso eléctrico chega vindo do segundo sensor é considerado o tempo de viagem do impulso mecânico dentro do provete.

Como as distâncias euclidianas entre cada sensor são conhecidas este método permite-nos determinar a velocidade linear média do impulso dentro do provete entre cada par de sensores. Os tempos

³Nota: Enquanto que a mangueira da tensão radial interna só é purgada já na prensa, a câmara de pressão de óleo hidráulico da célula de Hoek é purgada na bancada. Assim é, não só por facilitar a operação de purga, mas também para garantir que a posição dos sensores relativamente ao provete não se altera. Com efeito a pequena pressão que é introduzida na câmara é suficiente para manter todo o conjunto imóvel.

“trocados”, isto é, o tempo do mesmo percurso medido com os papéis dos sensores invertidos são vitais para controlar a estabilidade e fiabilidade dos sensores.

Esta medição dos tempos de viagem entre sensores foi registada para cada incremento das tensões de confinamento.

Dos ensaios válidos feitos, quatro foram ensaiados com tensões de confinamento iguais às tensões axiais (1 MPa), garantindo que a rotura era produzida pela pressão interna introduzida na mangueira. Outros quatro foram ensaiados a 2 MPa e quatro outros foram ensaiados a 3 MPa. Assim foram registados doze *sets* de tempos para 1 MPa, oito *sets* para 2 MPa e quatro para 3 MPa.

Estes níveis de carga não são aleatórios. Se a pressão dentro da câmara de pressão do óleo exceder os 3.5 MPa, a resina que impermeabiliza as aberturas onde estão acondicionados os sensores cede, permitindo que o óleo contacte a amostra. O mesmo é verdade para os furos por onde saem os cabos coaxiais dos sensores, ainda que para estes a pressão crítica seja um pouco acima dos 4 MPa. Por este motivo teve de se impor o limite de 3 MPa para a carga máxima de confinamento, as restantes cargas forma definidas em função desta, a $1/2$ e $1/3$ da carga máxima, 2 MPa e 1 MPa respectivamente.

2.5 Carregamento radial interno até à rotura franca.

Após o término da validação dos sensores, estes são ligados aos pré amplificadores completando assim o circuito do grupo de aquisição de dados. Com auxilio de uma vareta metálica é artificialmente gerado um evento acústico na superfície externa do corpo da célula triaxial de Hoek, podendo assim verificar-se se o sistema é capaz de registar o evento (testando-se a sensibilidade) e se o circuito está estável. Confirmada a sensibilidade e estabilidade do sistema inicia-se o incremento do carregamento da tensão radial interna. Este carregamento é feito manualmente a um ritmo aproximado de 0.7 MPa por segundo. São feitos registos dos eventos acústicos acumulados relativamente à tensão radial interna.

O aumento da tensão radial interna é interrompida quando, simultaneamente, o número de eventos acústicos dispara e as tensões de confinamento baixam repentinamente. São ainda indicativos claros da rotura do provete, o audível som característico da rotura de um provete e um derrame de óleo que escorre do êmbolo inferior.

O provete é descarregado, removido e fotografado.⁴

É também registado o número de eventos ocorridos até ao momento da rotura, sendo os registos ocorridos posteriormente a esse descartados por estarem contaminados pelo ruído da injeção de fluido na fractura. Sendo que é certo que este procedimento exclui parte dos EA da rotura é também o único que garante a não contaminação dos dados.

⁴ Nota: O ensaio é abortado caso se note um derramamento de óleo prematuro pois tal é indicativo de rompimento da mangueira, regra geral por defeito da mesma.

Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 3, onde σ_{RADIAL} corresponde à pressão de confinamento externa, σ_{AXIAL} corresponde á tensão axial de confinamento, σ_{IEA} corresponde à pressão interna para a qual foi registado o primeiro evento acústico e σ_{ROTURA} corresponde à pressão interna para a qual ocorreu a rotura franca dos provetes. A identificação dos provetes ensaiados é feita a com o prefixo PV, abreviatura de provete, seguido de dois dígitos com o número que identifica a ordem pela qual os espécimens foram ensaiados. Os ensaios dos provetes PV01, PV04, PV06, PV08, PV18, PV22, PV23 e PV33 estão ausentes da tabela por terem sido ensaios abortados e invalidados. O sufixo c no ensaio PV34c foi acrescentado por ter sido necessário montar o mesmo varias vezes devido a sinais anómalos dos sensores.

Proвете	σ_{AXIAL}	σ_{RADIAL}	σ_{IEA}	σ_{ROTURA}	Nº Total de Eventos
PV02	3	3	14	14	267
PV03	2	2	16	17	600
PV05	3	3	4	24	681
PV07	3	3	24	27	1648
PV09	3	3	26	26	150
PV10	3	3	28	28	106
PV11	3	3	4	30	27
PV12	2	2	10	21	1021
PV13	2	2	28	28	690
PV14	2	2	7	24	721
PV15	2	2	13	24	932
PV16	2	2	3	23	399
PV17	1	1	17	20	869
PV19	1	1	10	22	1060
PV20	1	1	1	23	573
PV21	1	1	20	20	715
PV24	1	1	25	25	315
PV25	2	2	26	26	1343
PV26	3	3	4	29	919
PV27	1	1	1	28	1165
PV28	2	2	7	27	1182
PV29	1	1	14	25	1203
PV30	1	1	2	20	1171
PV31	2	2	13	26	1554
PV32	2	2	4	26	589
PV34c	3	3	1	29	2589
PV35	3	3	10	28	331
PV36	3	3	4	27	334
PV37	3	3	10	28	411
PV38	1	1	7	20	905
PV39	1	1	1	18	588
PV40	2	2	4	23	679

Tabela 3 – Resumo dos ECO realizados.

2.6 Aquisição e tratamento de dados

Porque a informação tem de ser fisicamente guardada em disco e esse processo consome não só espaço de armazenamento mas também capacidade de processamento, a aquisição de dados não pôde ser feita em contínuo, por este motivo é importante definir três conceitos simples. É necessário definir-se um intervalo de tempo mínimo ao fim do qual é feito o registo do estado dos sensores a serem testados. A frequência deste registo, e o teste para validação do mesmo, é denominada taxa de aquisição de dados. Por outro lado, por motivos descritos abaixo em 2.6.1, foi necessário definir um limite mínimo a partir do qual a atividade dos sensores não é registada, falhando a validação, este limite é denominado *threshold*. Por último é necessário definir um *trigger*, isto é, a condição cuja satisfação é necessária para que o sistema passe de um regime de teste periódico (A) para um regime de aquisição de dados numa frequência superior (B) que promova a definição e qualidade dos dados. Este *trigger* é então definido como sendo o registo em que o sinal lido no sensor está acima do *threshold* e é por isso válido. Posto isto, a taxa de procura para aquisição de dados é de 1032 KHz, isto é aproximadamente a cada micro segundo os sensores são testados de acordo com um *threshold*. Qualquer um dos quatro sensores pode servir de *trigger*. Em caso de o *threshold* ser ultrapassado num dos sensores, tornando-se este no *trigger*, o instante da detecção do sinal é registado. A precisão de teste dos sensores, isto é a frequência com que são testados a partir do momento em que o *trigger* é fixo e o regime muda para o regime B, é de 4096 MHz, ou seja na casa da décima de nano segundo. Todavia só são registados tempos até aos nano segundos garantindo assim fiabilidade na medição.

Os dados são recuperados sob a forma de um ficheiro de texto (.txt), conforme a Tabela 4.

A primeira coluna é referente à ordem cronológica de detecção, a segunda refere-se ao sensor seguindo-se os parâmetros indicados no cabeçalho da Tabela 4. A última coluna é a referente ao instante de detecção do sinal. Um exemplo mais extenso do ficheiro original pode ser consultado nos Anexos.

#Ind	Sensor	Amp (dB)	Rácio Energ [mV/ms]	#Picos Onda	#Picos até Máx.	Duração (us)	Tempo até Máx (us)	RMS (dB)	ASL (dB)	Energia (mv*ms)	Inst deteção
0	2	100.0	914.5	280	13	18643	1040	91.3	85.2	1301853246.8	15:53:32:078 044076
1	2	100.0	794.4	129	3	17130	679	90.9	84.0	954880802.6	15:53:32:078 044445
2	4	100.0	516.0	62	0	15954	653	89.0	80.3	537900415.1	15:53:32:078 044477
3	4	100.0	319.7	38	9	14889	1604	86.3	76.1	290309253.4	15:53:32:078 045027
4	3	100.0	139.9	10	2	14656	12038	82.4	68.9	123093753.1	15:53:32:078 045100
5	2	100.0	105.0	5	4	14724	4747	81.0	66.4	93227663.5	15:53:32:078 045116
6	1	100.0	47.7	9	5	14874	12145	78.2	59.6	43224236.7	15:53:32:078 045128

Tabela 4 – Excerto do ficheiro de texto com os dados das Emissões Acústicas.

2.6.1 Filtragem do ruído electrostático.

A quando do início da realização dos ensaios notou-se a existência de um ruído electrostático intermitente que tornava a recolha de dados impossível. Foram tentados vários filtros para eliminar o ruído, no entanto não foi possível estabelecer um padrão que permitisse discernir claramente o ruído da informação. Por este motivo testou-se repetidamente o sistema com um *threshold* pertencente ao espectro de amplitudes dos 30 dB aos 100 dB, aumentando-se 5 dB a cada teste. Foi assim possível estabelecer que o ruído electrostático se encontra normalmente abaixo dos 65 dB embora por vezes tenha períodos em que o limiar ascende aos 75 dB.

Testou-se um filtro para os 75 dB, todavia isto fez diminuir a detecção de eventos acústicos abruptamente, na ordem dos 70%. Assim optou-se por um *threshold* a 65 dB, testando-se previamente a cada ensaio qual o limiar de ruído e ensaiando apenas quando o limiar se encontra abaixo dos 65 dB.

2.6.2 Emparelhamento dos Eventos Acústicos.

Como já referido, para localizar a EA_i , emissão acústica de índice i , é essencial conhecer x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} e t_{ij} , as coordenadas e instantes de detecção do evento de índice i nos sensores, S , de índice j , o que é trivial quando se considera apenas um evento isolado. Acontece no entanto, que durante o ensaio é caso frequente um sensor detectar um segundo evento, ou até mais do que um, antes que o primeiro evento tenha sido detectado pelos restantes sensores, é possível até, como representado na Figura 22, um sensor captar primeiro aquele que cronologicamente é o segundo evento e só depois o primeiro.

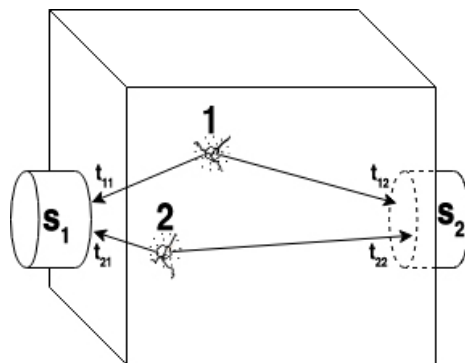


Figura 22 – Ambiguidade no emparelhamento dos eventos acústico.

De facto imagine-se o exemplo da Figura 22, em que instantes após a rotura que origina a primeira emissão se dá uma outra gerando uma segunda emissão. A ordem cronológica do registo das emissões fica, por exemplo, t_{21} , t_{11} , t_{12} e t_{22} . No caso de um emparelhamento cronológico ficar-se-ia com os instantes (t_{21}, t_{12}) para o “primeiro” evento, o que levaria a uma falsa localização. Além disso a detecção de um evento num sensor não implica a sua detecção nos restantes sensores. Este caso é

ilustrado na Figura 23 onde depois de ser registado pelo sensor 2, a presença de uma descontinuidade impossibilita que o evento seja registado em tempo útil no sensor 1.

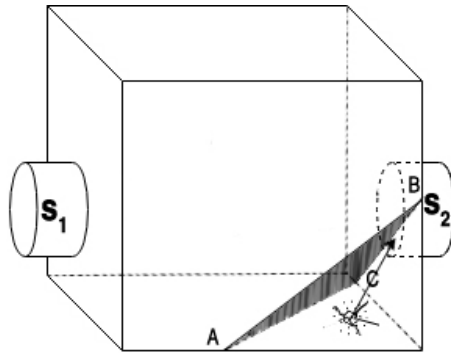


Figura 23 – Evento acústico parcialmente detectado.

Embora o software de recolha de dados utilizado disponibilize a opção de localização dos eventos acústicos, como se pode ver pela Tabela 4, não gera no ficheiro qualquer índice nem agrupamento dos eventos de acordo com o *trigger* que permita o seu emparelhamento. Por este motivo o primeiro passo para poder localizar os eventos é proceder ao seu correto emparelhamento.

Caso os dados se encontrassem sobre a forma de um perfil de onda o emparelhamento por comparação e ajuste dos perfis recolhidos em cada sensor seria trivial. Todavia apenas dispomos de dados estatísticos referentes ao sinal. Assim sendo foi necessário analisar os dados disponíveis para tentar emparelhar os eventos.

À primeira vista o número de picos de onda seria um bom candidato para o emparelhamento uma vez que, embora o sinal possa perder amplitude devido a fenómenos de dissipação de energia, o perfil de um sinal depende apenas do fenómeno que lhe deu origem e por isso o perfil do sinal seria o mesmo em todos os sensores. No entanto, devido ao *threshold* imposto para eliminar o ruído electrostático e aos fenómenos que atenuam a amplitude da onda, os picos de onda com amplitudes abaixo do limiar dos 65 dB não foram detectados, tornando esta abordagem impossível. Assim o emparelhamento teve de ser feito por um processo de tentativa e erro. Optou-se por criar um parâmetro temporal que permita estabelecer limites à diferença de tempos de chegada a cada sensor para um mesmo evento. Estes tempos são os tempos máximos registados para cada par de sensores durante a validação dos sensores, pelo que uma diferença de tempos superior às abaixo apresentadas é impossível. Desta forma foram criadas 6 condições temporais que os eventos emparelhados têm que satisfazer:

- $\Delta t_{(S1-S2)} \leq 9,9 \mu s$;
- $\Delta t_{(S1-S3)} \leq 15,4 \mu s$;
- $\Delta t_{(S1-S4)} \leq 15,2 \mu s$;
- $\Delta t_{(S2-S3)} \leq 14,9 \mu s$;
- $\Delta t_{(S2-S4)} \leq 15,9 \mu s$;
- $\Delta t_{(S3-S4)} \leq 9,8 \mu s$.

Os dados do instante de tempo em que o sinal é detectado são apresentados num código numérico composto por 15 dígitos separados por dois pontos ou espaço, conforme se ilustra na Figura 24, em que:

- os primeiros dois dígitos correspondem à hora (h) do dia, 24/24, seguido de dois pontos;
- o terceiro e quarto dígito correspondem ao minuto (min) da hora, seguido de dois ponto;
- o quinto e sexto dígitos correspondem ao segundo (s), seguido de dois pontos;
- o sétimo, oitavo e nono dígitos correspondem ao milissegundo (ms) seguido de espaço;
- o décimo, décimo primeiro e décimo segundo dígitos correspondem ao micro segundo (μ s);
- o décimo terceiro, décimo quarto e décimo quinto dígitos correspondem ao nano segundo (ns);

$$\begin{array}{cccccc} \text{h} & \text{min} & \text{s} & \text{ms} & \mu\text{s} & \text{ns} \\ \hline 15 & : & 53 & : & 32 & : & 078 & 044076 \end{array}$$

Figura 24 – Um instante de detecção.

Esta formatação não permite o tratamento dos dados pelo que foi necessário uma conversão para uma única unidade. A unidade escolhida foi o nano segundo, logo as conversões necessárias são:

- $1 \mu\text{s} = 10^3 \text{ ns}$;
- $1 \text{ ms} = 10^6 \text{ ns}$;
- $1 \text{ s} = 10^9 \text{ ns}$;
- $1 \text{ min} = 6 \times 10^{10} \text{ ns}$;
- $1 \text{ h} = 3,6 \times 10^{12} \text{ ns}$,

pelo que, tomando como exemplo o que se apresenta na Figura 24, temos:

$$\begin{aligned} & [\text{h}] \times 3,6 \times 10^{12} + [\text{min}] \times 6 \times 10^{10} + [\text{s}] \times 10^9 + [\text{ms}] \times 10^6 + [\mu\text{s}] \times 10^3 + [\text{ns}] \\ & = \text{instante} [\text{ns}] \\ & 15 \times 3,6 \times 10^{12} + 53 \times 6 \times 10^{10} + 32 \times 10^9 + 78 \times 10^6 + 44 \times 10^3 + 76 \\ & = 57212078044076 \text{ ns} \end{aligned} \quad [03]$$

Pela aplicação da equação 3 ao exemplo da Figura 24 é possível observar que podemos descrever qualquer instante com apenas catorze dígitos. Este numero é abaixo da precisão de trabalho da maioria das ferramentas de cálculo disponíveis. De facto seria possível operar sobre estes valores guardando os mesmo sobre a forma de um número inteiro de 64-bit, int64. Todavia, devido a operações de normalização a que estes valores são submetidos posteriormente, a precisão é degradada pelo que se perderia a definição necessária para a localização efetiva dos eventos.

À primeira vista a solução passaria por truncar o inteiro em duas partes de sete dígitos utilizando depois, uma combinação de testes lógicos para determinar a ordem cronológica dos eventos. No entanto, é conhecida a velocidade linear média das ondas sísmicas P dentro dos provetes ($C_p \approx 4360 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) e sendo esta uma função que depende apenas do material em que a onda se desloca, facilmente se torna aparente que os eventos são discerníveis à escala dos milissegundos. A esta velocidade, ao cabo de um milissegundo um sinal com origem num evento acústico viajaria 4,36 m, enquanto que a dimensão maior do provete são cerca de 94 mm.

Assim recorrendo novamente ao exemplo acima, o instante de tempo em que o sinal foi detectado é representado, após o emparelhamento, como 078044076 ns. Restringindo-nos ao exemplo apresentado na Tabela 4 teríamos o quarteto:

$(t_{S1}, t_{S2}, t_{S3}, t_{S4}) = (078\ 045128, 078\ 044076, 078\ 045100, 078\ 044477)$.

3 Localização da origem das EA

O método proposto para localizar a origem dos eventos decompõe-se em 6 elementos: matriz de treino, rede neuronal, modelo de tempos, Inversão do problema, aproximação inicial e localização.

3.1 Matriz de treino

Para elaborar a matriz de treino foram escolhidos ao acaso, de entre os espécimens para ensaio, três provetes, doravante denominados PVT1, PVT2 e PVT3. Em cada um dos espécimens foi estampada na superfície uma malha, 15:24, de 360 pontos uniformemente distribuídos ao longo de 15 linhas perpendiculares ao eixo do provete (Figura 25), sendo a distância mínima entre pontos adjacentes é de 5,5 mm. Todavia, o diâmetro dos sensores utilizados é de 15 mm pelo que esta definição da malha é demasiado apertada. Assim foram numerados apenas os pontos das linhas e colunas ímpares, duplicando o espaçamento mínimo entre pontos adjacentes ficando uma malha 8:12 com 96 pontos. Em seguida foram acoplados os quatro sensores de forma a que em todos os provetes a localização de cada sensor relativamente a todos os pontos da malha 8:12 seja igual. Assim são conhecidas não só as coordenadas de cada ponto da malha, mas também as coordenadas do centro de cada um dos sensores.

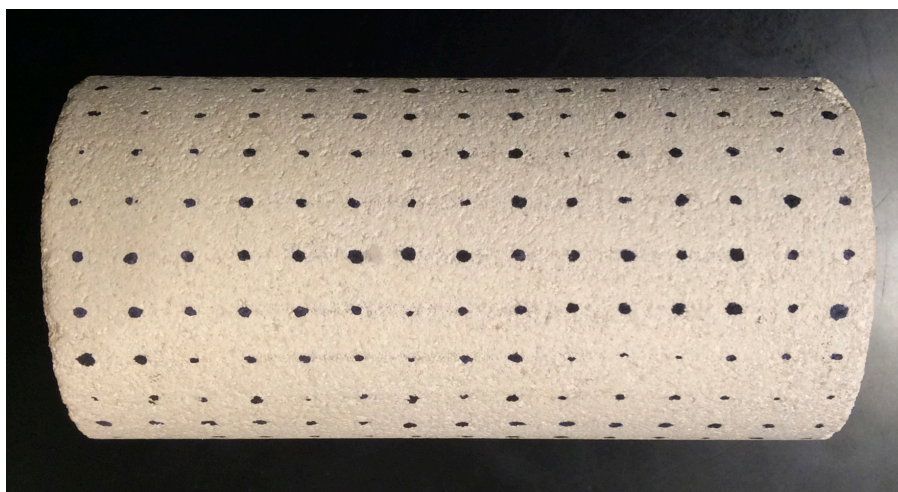


Figura 25 – Malha da matriz de treino, PVT3.

Dos 96 pontos da matriz apenas noventa ficam disponíveis para ser solicitados após o acoplamento dos sensores, uma vez que devido ao seu diâmetro os sensores cobrem alguns dos pontos da malha. Para simplificar a implementação as coordenadas foram referenciadas num sistema de coordenadas cilíndricas com origem no centro da base superior do espécimen e do tipo (ρ, θ, z) , conforme a Figura 26.

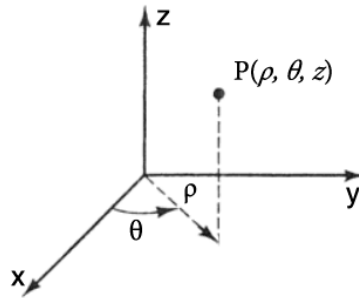


Figura 26 - Coordenadas Cilíndricas

Os tempos de resposta dos quatro sensores são então testados para cada um dos pontos da matriz. Para este efeito são artificialmente gerados 10 eventos acústicos de teste, em cada ponto, com recurso à fonte de Hsu-Nielsen, *pencil lead break* (Hsu, 1977). A fonte de Hsu-Nielsen consiste na flexão até à rotura, sobre a superfície do espécimen, de uma ponta de mina de dureza H2 com comprimento entre os 3 mm e os 5 mm (Figura 26).

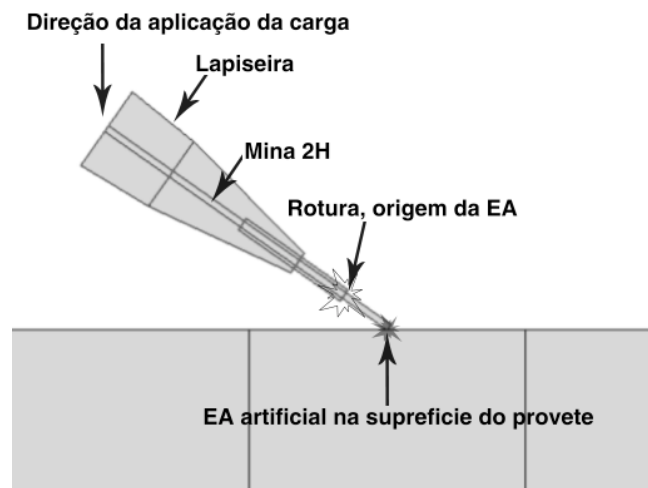


Figura 27 – Fonte de Hsu-Nielsen, adaptado de(SAUSE, 2011).

Ao quebrar, a mina liberta subitamente a tensão acumulada originando uma onda acústica. Segundo M. Sauce, o valor para a grafite da mina do módulo de Young é de 10.5 GPa e a densidade (ρ) de $1.78 \times 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$ ambos resultado de retro análise de simulações numéricas e comparadas com ensaios laboratoriais (SAUSE, 2011). Uma vez que se assume que a onda acústica dentro da mina é uma onda unidirecional, conforme a Equação 4:

$$C_{p_{grafite}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 4323 \text{ m.s}^{-1} \quad [04]$$

Temos que, em menos de um μs o impulso chega à interface da mina-provete dando origem à EA artificial que é detectada pelos sensores. Verificou-se que este impulso tem características muito próprias, caracterizando-se por uma amplitude muito elevada na ordem dos 130 dB, o que o destaca de qualquer eventual ruído facilitando o emparelhamento dos tempos a registar para a matriz de treino.

Depois de testados todos os 90 pontos em ambos os provetes a informação foi organizada em duas matrizes 900x7 do tipo apresentado na Equação 5:

$$M_{teste_{cil}} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \theta_1 & z_1 & tS1_1 & tS2_1 & tS3_1 & tS4_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{900} & \theta_{900} & z_{900} & tS1_{900} & tS2_{900} & tS3_{900} & tS4_{900} \end{bmatrix}, \quad [05]$$

onde ρ_i , θ_i , z_i são as coordenadas cilíndricas dos pontos da matriz, isto é a origem dos eventos, e $tS1_i$, $tS2_i$, $tS3_i$, $tS4_i$ os tempos de detecção do sinal pelos sensores. Optou-se nesta fase por passar do referencial cilíndrico para o referencial cartesiano, mantendo todavia a origem, Equação 6.

$$M_{teste_{cart}} = \begin{bmatrix} \rho_1 \cos \theta_1 & \rho_1 \sin \theta_1 & z_1 & tS1_1 & tS2_1 & tS3_1 & tS4_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{900} \cos \theta_{900} & \rho_{900} \sin \theta_{900} & z_{900} & tS1_{900} & tS2_{900} & tS3_{900} & tS4_{900} \end{bmatrix} \quad [06]$$

Posteriormente a matriz M_{teste} foi dividida em duas matrizes com a mesma indexação; a matriz $PREINPUT$ e a matriz $PRETARGET$, Equações 7 e 8 respectivamente:

$$PREINPUT = \begin{bmatrix} \rho_1 \cos \theta_1 & \rho_1 \sin \theta_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{900} \cos \theta_{900} & \rho_{900} \sin \theta_{900} & z_{900} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{900} & y_{900} & z_{900} \end{bmatrix} \quad [07]$$

$$PRETARGET = \begin{bmatrix} tS1_1 & tS2_1 & tS3_1 & tS4_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ tS1_{900} & tS2_{900} & tS3_{900} & tS4_{900} \end{bmatrix} \quad [08]$$

3.2 Rede Neuronal Artificial

Tipicamente recorre-se a redes neuronais artificiais quando se pretende aproximar a relação entre dois conjuntos em que um é dependente do outro mas a forma da dependência é desconhecida. Com efeito o problema da localização da origem do evento acústico pode ser descrito como a resolução do sistema descrito pela equação 9:

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = \bar{v}_i^2 (t_i - T_s)^2, \quad [09]$$

no caso com $s = 1, 2, 3$ e 4 , pelo que:

$$\begin{aligned} (x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + (z_i - z_1)^2 &= \bar{v}_i^2 (t_i - T_1)^2 \\ (x_i - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2 + (z_i - z_2)^2 &= \bar{v}_i^2 (t_i - T_2)^2 \\ (x_i - x_3)^2 + (y_i - y_3)^2 + (z_i - z_3)^2 &= \bar{v}_i^2 (t_i - T_3)^2 \\ (x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + (z_i - z_4)^2 &= \bar{v}_i^2 (t_i - T_4)^2 \end{aligned} \quad [10]$$

em que o trio (x_i, y_i, z_i) são as coordenadas cartesianas da origem do evento, (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) e (x_4, y_4, z_4) são as coordenadas do centro das superfícies de contacto dos sensores S1, S2, S3 e S4 com o espécimen, respectivamente. t_i e o quarteto (T_1, T_2, T_3, T_4) são respectivamente os instantes em que o evento tem origem e em que é detectado em cada um dos sensores. \bar{V}_i é a velocidade média da onda elástica no meio. Analisando \bar{V}_i quanto à sua dependência notamos que esta não pode ser simplesmente descrita, tal como na Equação 11, como sendo:

$$\bar{V}_i = \frac{l_i}{\Delta t_i} = \frac{\sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2}}{T_s - t_i} \quad [11]$$

Em primeiro lugar o termo $T_s - t_i$ implica uma dependência do instante em que o evento tem origem, o que é uma incógnita. Além disso, devido aos fenómenos de refacção das ondas e à própria geometria do espécimen, o caminho percorrido pela onda elástica não pode ser descrito como sendo a distância euclidiana entre a origem do evento e o sensor. Assumindo por simplificação um campo de velocidades diferenciável, é possível com a Equação 12 definir de forma mais correta a velocidade média:

$$\bar{V}_i = \frac{1}{T_s - t_i} \int_{t_i}^{T_s} \vec{Cp}(\gamma(t)) * \gamma'(t) dt, \quad [12]$$

onde $\vec{Cp}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^+$ e $\gamma: \mathbb{R}^{0+} \rightarrow \mathbb{R}^3$ são respectivamente o campo de velocidades e o percurso real da onda elástica e ambas são funções de expressão exata desconhecida. A forma da função γ é função de (x_i, y_i, z_i) e (x_s, y_s, z_s) , isto é para cada par existe uma função γ diferente. Logo o termo \bar{V}_i passa a ser melhor definido pelo termo \bar{V}_s , para cada ponto de origem diferente.

Assim, torna-se claro que o sistema é um sistema indeterminado e de expressão exata desconhecida, pelo que a utilização de uma rede neuronal por forma a aproximar a relação entre as variáveis se torna apelativa.

A abordagem direta supõe como input os instantes de detecção do sinal e output as coordenadas cartesianas da origem do evento acústico. Isto é, quatro entradas e três saídas, o que respeita o princípio de manter o número de parâmetros de entrada superior ou igual ao número de parâmetros de saída. No entanto não é possível obter resultados satisfatórios com esta abordagem independentemente do número de neurónios na camada escondida.

Assim, invertendo a abordagem, a arquitetura de rede escolhida foi a representada pelo diagrama 12:24:6. Isto é, como mostra o diagrama da Figura 28 a rede tem doze entradas, uma camada escondida com vinte e quatro neurónios e uma camada com seis saídas.

Uma regra prática para a construção de redes neuronais artificiais é a de que o número de neurónios na camada escondida deve ser um múltiplo comum do número de parâmetros de entrada e de saída. Constatou-se que o treino da rede tem melhor desempenho quando o número de neurónios na camada escondida é superior ao da camada de entrada.

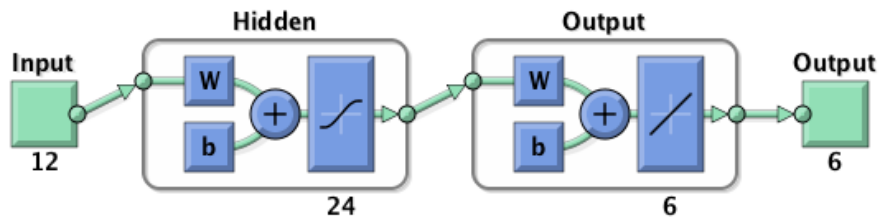


Figura 28 - Diagrama da rede neural. Gerado automaticamente em MATLAB.

Por outro lado, o treino de uma rede neural não é senão um processo de ajuste de parâmetros com vista a promover o reconhecimento de padrões. Uma outra regra prática é a de não forçar o sobreajustamento da rede neural para que esta não perca a capacidade de prever para além do conjunto de treino. Isto é, não gerar mais parâmetros do que o número de elementos de treino da rede. Neste caso tem-se, como explicado abaixo, 675 eventos de treino pelo que o número de parâmetros a ajustar deverá ser sempre inferior a este.

Com 24 neurónios na camada escondida o número de parâmetros a ajustar a cada iteração será 492. Já com 36 neurónios na camada escondida, o múltiplo comum seguinte, o número de parâmetros a ajustar a cada iteração é 732 o que é acima do número de eventos utilizados no treino da rede pelo que produziria um sobreajustamento da rede. Por este motivo optou-se por uma camada escondida com 24 neurónios.

3.2.1 Estrutura dos neurónios da camada escondida

Cada neurónio da camada escondida é constituído por uma combinação linear das entradas de alimentação, seguido da aplicação de uma função não linear sigmoide $f: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ chamada função de ativação.

A função f é genericamente definida segundo a Equação 13:

$$f(s) = \frac{1}{1+e^{-\beta s}}, \quad [13]$$

Onde β (b na Figura 28) é um parâmetro que define a derivada na origem e a curva na zona de transição, e s é o produto da combinação linear acima referida e é definido pela Equação 14:

$$s = w^T \tilde{c}, \quad [14]$$

sendo $\tilde{c} = [1, c_1, \dots, c_n]^T$ o vector estendido das entradas no neurónio e $w = [w_0, w_1, \dots, w_n]^T$ o vector dos pesos.

3.2.2 Treino da Rede Neuronal Artificial

A rede neuronal criada é uma rede multicamada feedforward com retro-propagação do erro; o algoritmo de treino utilizado foi o algoritmo de Levenberg-Marquardt, doravante denominado ALM. O ALM foi primeiramente descrito por (Marquardt, 1963), é um algoritmo muito utilizado e com inúmeras aplicações. A sua aplicação ao treino de redes neuronais é descrita em (Martin T. Hagan & Menhaj, 1994) e em (M T Hagan, Demuth, & Beale, 1996). A versão aqui utilizada do algoritmo é a incluída no software MATLAB da The MathWorks, Inc. À semelhança dos métodos quasi-Newton, o ALM foi concebido por forma a se aproximar de uma velocidade de treino quadrática sem que para isso se tenha de calcular a matriz Hessiana. Esta versão do algoritmo de treino tem a particularidade de interromper o treino prematuramente em caso de se verificar um aumento ou uma estabilização prolongada da soma dos erros quadráticos médios ($\sum EMQ$) das amostras de validação, isto é, uma diminuição ou estagnação da performance da rede. Uma vez que a performance da rede é avaliada pela $\sum EMQ$, então a matriz Hessiana H pode ser aproximada pela equação 15:

$$H = J^T J, \quad [15]$$

e o gradiente g pode ser calculado pela equação 16:

$$g = J^T e, \quad [16]$$

onde J é a matriz Jacobiana computada através da retro-propagação do erro, contendo a derivada de primeira ordem dos erros respeitantes aos pesos w e parâmetros β , e e é o vector dos erros da rede. A atualização dos pesos w e parâmetros β é feita através da função descrita na equação 17:

$$q_{k+1} = q_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e, \quad [17]$$

onde μ é um escalar que aproxima o ALM ao método de Newton quando tende para 0. A cada iteração com sucesso, isto é, em que a performance da rede aumenta, μ diminui.

O conjunto que alimenta a camada de entrada é uma matriz $C = 12 \times Q$, onde Q é o número de eventos detectados. As colunas desta matriz são definidas como exemplificado no equação 18:

$$C = [x_{s1} - x_i \quad y_{s1} - y_i \quad z_{s1} - z_i \quad x_{s2} - x_i \quad y_{s2} - y_i \quad z_{s2} - z_i \quad x_{s3} - x_i \quad y_{s3} - y_i \quad z_{s3} - z_i \quad x_{s4} - x_i \quad y_{s4} - y_i \quad z_{s4} - z_i] \quad [18]$$

O conjunto de saída é a matriz $T = Q \times 6$, em que os elementos são definidos segundo o equação 19:

$$T = [T_{s1} - T_{s2} \quad T_{s1} - T_{s3} \quad T_{s1} - T_{s4} \quad T_{s2} - T_{s3} \quad T_{s2} - T_{s4} \quad T_{s3} - T_{s4}] \quad [19]$$

Para treinar a rede as matrizes PREINPUT e PRETARGET são transformadas na forma apresentada nas equações 18 e 19, respectivamente, denominando-se INPUT e TARGET. Posto isto, e mantendo a indexação entre INPUT e TARGET, o algoritmo de treino divide as matrizes em três grupos (Treino, Validação e Teste) compostos por entradas aleatórias e não consecutivas das matrizes originais. Assim os dados de treino ficam divididos conforme a Tabela 5:

	Treino	Validação	Teste
INPUT	INPUTtr	INPUTv	INPUTte
TARGET	TARGETtr	TARGETv	TARGETte
	75%	15%	10%

Tabela 5 - Divisão dos dados para treino da rede neuronal

A expressão Dados de Treino denomina doravante o conjunto das matrizes INPUTtr e TARGETtr, analogamente Dados de Validação e Dados de Teste denominam respectivamente os conjuntos INPUTv, TARGETv e INPUTte, TARGETte.

A cada iteração a totalidade dos dados de treino é avaliada e, utilizando a função da equação 16, o algoritmo atualiza para cada neurónio o vector w e o parâmetro β . Depois a rede é avaliada testando os dados de validação e os de teste. Todavia apenas a resposta da avaliação dos dados de validação é utilizada para o cálculo da iteração seguinte, sendo o resultado da avaliação dos dados de teste apenas um indicador da progressão da performance e generalização da rede ao longo do treino e sem influência no mesmo. A generalização da rede é contudo um parâmetro importante, mede a capacidade da rede descrever eventos fora do conjunto de treino, o que é essencial para que possa posteriormente ser utilizada na localização das EA nos ensaios. As dimensões dos vectores \tilde{c} e w para cada um dos neurónios da camada escondida é igual, no entanto o vector w pode ter elementos nulos, o que tem por consequência eliminar a influencia da entrada \tilde{c} correspondente. Este processo de apuramento dos vectores w e parâmetros β continua até ser atingido um dos critérios de paragem. O critério de paragem atingido foi o limite de 50 iterações ou épocas sem uma melhoria da performance de validação.

Como é possível observar na Tabela 5, a performance final da rede durante o treino revelou-se satisfatória com EMQ baixos e percentagem da variabilidade explicada pelo modelo, R^2 , na ordem dos 93%. Além disso destaca-se a boa performance da capacidade de generalização da rede. Os gráficos da regressão linear da rede neuronal artificial bem como a performance do treino e o histograma dos erros ao longo do treino pode ser consultado nos Anexos.

	Nº amostras	EMQ	R^2
Treino	674	4,80	0,930
Validação	135	4,53	0,932
Teste	90	5,29	0,929

Tabela 6 - Resumo da Performance e Regressão da rede neuronal.

Nota-se também, como evidenciado pela distribuição das diferenças entre os valores esperados e os aproximados, na Figura 29, a maioria dos padrões teve uma boa aproximação sendo que mais de 60% tem erro inferior a 2.5 ns.

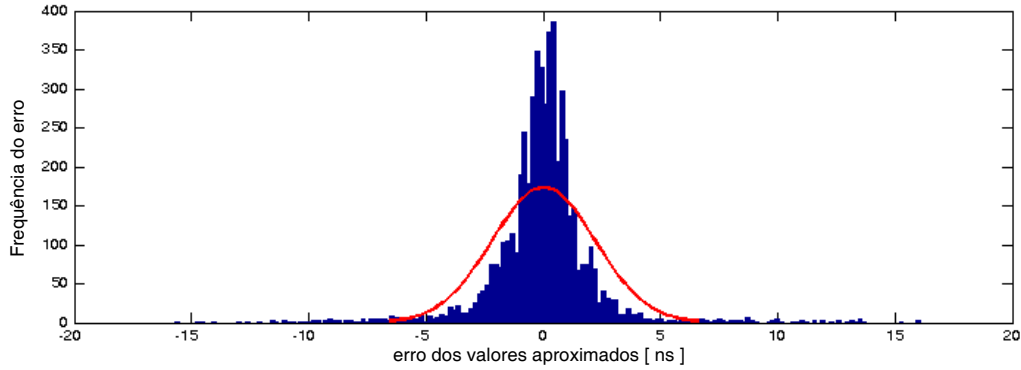


Figura 29 - Distribuição dos erros entre os valores esperados e os valores aproximados pela rede neuronal. O eixo das abcissas em ns e sendo o das ordenadas a frequência.

Uma vez treinada, a rede neuronal é uma função (h) capaz de aproximar, através das coordenadas da origem de um evento, a diferença entre os instantes de detecção desse mesmo evento em cada um dos sensores. Para poder localizar a origem dos eventos com base na diferença entre os tempos de chegada aos sensores é necessário inverter o problema.

3.3 Resolução do Problema Inverso

Consideremos a função $h: \mathbb{R}^{12} \rightarrow \mathbb{R}^6$ gerada pela rede neuronal e genericamente definida na equação 20:

$$h(c) = t', \quad [20]$$

onde $c \in \mathbb{R}^{12}$ e $t' \in \mathbb{R}^6$, como sendo a função que simula a diferença entre os instantes de tempo em que o evento acústico é detectado em cada um dos sensores. Consideremos também a função objectivo $\varepsilon: \mathbb{R}^{18} \rightarrow \mathbb{R}$ definida pela equação 21:

$$\varepsilon(c, T_j) = \sum_{i=1}^6 (h_i(c) - T_{ji})^2, \quad [21]$$

sendo T_j uma entrada da matriz definida na equação 19. Uma forma de resolver o problema inverso é minimizar ε , onde as coordenadas da origem do evento j , (C_j), são aproximadas pela Equação 22:

$$C_j \approx \tilde{C}_j = \min_c \varepsilon(c, T_j), \quad [22]$$

sendo para isso necessário escolher um algoritmo de minimização e uma aproximação inicial x_0 .

É importante tecer algumas considerações sobre a minimização da função objectivo ε . Por um lado é necessário estabelecer que qualquer algoritmo utilizado terá de permitir constrangimentos. Isto deve-se ao facto da função h ser gerada a partir de uma rede neuronal. Uma vez que o domínio de aplicação de uma rede neuronal é exclusivo ao domínio delimitado pelos pontos da sua matriz de treino a rede não permite inferir sobre pontos externos à mesma. Logo uma função de minimização que não acautele constrangimentos produzirá resultados insatisfatórios. Acontece ainda que ε não é uma função convexa, pelo que não possui um único mínimo local que seja também o mínimo global. De facto, constatou-se que, para T_j constante, a amplitude da distancia euclidiana entre C_j e \tilde{C}_j depende enormemente da aproximação inicial x_0 , sendo por isso fundamental fornecer a melhor aproximação possível ao algoritmo de minimização.

3.3.1 Constrangimentos impostos à minimização da função objectivo ε

Os constrangimentos necessários são aqueles que limitam a busca de soluções que minimizem a função objectivo ε ao domínio sobre o qual a rede neuronal tem capacidade de previsão, isto é, limitam a busca ao interior do espécimen. Assim sendo, os constrangimentos necessários são parametrizações geométricas definidas pelas inequações 23 e 24 que definem o volume do espécimen, cujas dimensões se podem observar na Figura 18:

$$2,25^2 \leq x_i^2 + y_i^2 \leq 21^2 \quad [23]$$

$$0 \geq z_i \geq -84 \quad [24]$$

Uma vez que estes constrangimentos são inequações não lineares, o algoritmo de minimização escolhido foi o *fmincon* disponibilizado na MATLAB-Optimization Toolbox 7.0. A matriz Hessiana foi aproximada pelo método do ponto interior.

3.3.2 Aproximação inicial x_0 em função de T_j

Embora a aproximação inicial x_0 seja um parâmetro muito crítico na localização, não foi possível desenvolver nem um método matemático expedito nem um critério empírico que permitisse generalizar um valor para as entradas do vetor c_0 , definido pela função $k: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{12}$ explicitado na equação 25:

$$k(x_n) = c_n$$

[25]

A abordagem inicial foi a de utilizar como aproximação inicial primeiro a origem do sistema de coordenadas (0,0,0) e depois as coordenadas do centro do espécimen (0,0,-42). Em ambos os casos os resultados foram insatisfatórios não permitindo a localização dos eventos. Optou-se então pela implementação de uma rotina que testa todas as coordenadas dos pontos da matriz de treino, doravante denominado conjunto \mathcal{P} , escolhendo como aproximação inicial aquele cujo resultado final apresenta-se o menor valor de ε . Por forma a ter um maior controlo sobre a escolha introduziu-se um sistema de penalidades na comparação dos vários ε . Verificou-se que, embora não em todos os ensaios, muitas vezes a localização com o menor ε ficava fora do volume do espécimen, produzindo erros grandes na localização. Afim de evitar este fenómeno criou-se um conjunto de testes que atribuem bónus ou penalizações ao valor de ε por forma a encorajar o sistema a dar primazia aos eventos cujas localizações se encontram dentro dos volumes previamente definidos. As correções, embora muito pequenas e sem capacidade de eliminar por completo as localizações fora dos volumes corretos, permitiram contudo uma redução superior a 80% no número destas ocorrências.

Esta abordagem produziu melhorias comparativamente com abordagem inicial, no entanto apresentava dois problemas:

O primeiro era a quantidade de iterações necessárias para achar a melhor solução. A localização de cada evento singular pode durar vários minutos, fazendo com que a análise de um ensaio completo demorasse tipicamente mais de vinte e quatro horas e em alguns casos mais de quarenta e oito horas.

O segundo problema era que em alguns casos existem várias aproximações iniciais cujos ε 's finais apresentam valores muito semelhantes e em que a solução que apresenta o menor valor de ε não é a solução ideal, provocando um erro enorme na localização do evento. Verificou-se que as aproximações iniciais nestas condições eram normalmente simétricas em relação ao centro do provete.

Assim foi necessário estabelecer uma forma de diminuir o universo de pontos testados, eliminando tempo de cálculo e potenciais ambiguidades prejudiciais à eficácia da localização. A solução apresentada foi uma divisão virtual do provete em oito subvolumes, fazendo-se uma pré distribuição dos eventos pelos subvolumes.

Dividiu-se o conjunto \mathcal{P} em oito subconjuntos \mathcal{P}_{ij} , com $i \neq j$ e $i, j \in \{1,2,3 \text{ e } 4\}$. A distribuição dos pontos da matriz de treino pelos subconjuntos \mathcal{P}_{ij} é definida, com auxílio das equações 26 e 27, da seguinte forma:

Seja $p_k = (x_k, y_k, z_k)$ um qualquer ponto contido em \mathcal{P} e $t_k = (t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}, t_{s4})$ o vector que contem os instantes de tempo em que o evento acústico com origem em p_k foi detectado em cada um dos sensores. Então $p_k \in \mathcal{P}_{ij}$ quando:

$$t_{si} < \min\{t_{s\alpha 1}, t_{s\alpha 2}, t_{s\alpha 3}\}, \quad [26]$$

com α_1, α_2 e $\alpha_3 \neq i$, e

$$t_{si} < t_{sj} < \min\{t_{sz1}, t_{sz2}\}, \quad [27]$$

com $\{\alpha_1, \alpha_2\} \notin \{i, j\}$. Considerando apenas os pontos pertencentes a \mathcal{P}_{ij} foi possível diminuir o tempo de localização de um ensaio completo para um tempo médio abaixo de 15 minutos.

Um excerto do código produzido para a localização pode ser consultado nos Anexos.

3.4 Teste da precisão do sistema

Para poder inferir quanto à eficácia e precisão do sistema em cada uma das coordenadas testou-se a capacidade de localizar eventos cuja origem já é conhecida. Para este efeito utilizaram-se os eventos registados na matriz de treino para o espécimen PVT1, tendo a rede neuronal sido treinada com os eventos de treino do espécimen PVT2. O resultado da localização dos 900 eventos testados está apresentado na Figura 30, vista 3D à esquerda e vista contra o plano xy à direita, onde é possível observar a boa capacidade para localizar os eventos na superfície do provete. As localizações representadas a azul são as propostas pelo sistema e as vermelhas as localizações conhecidas.

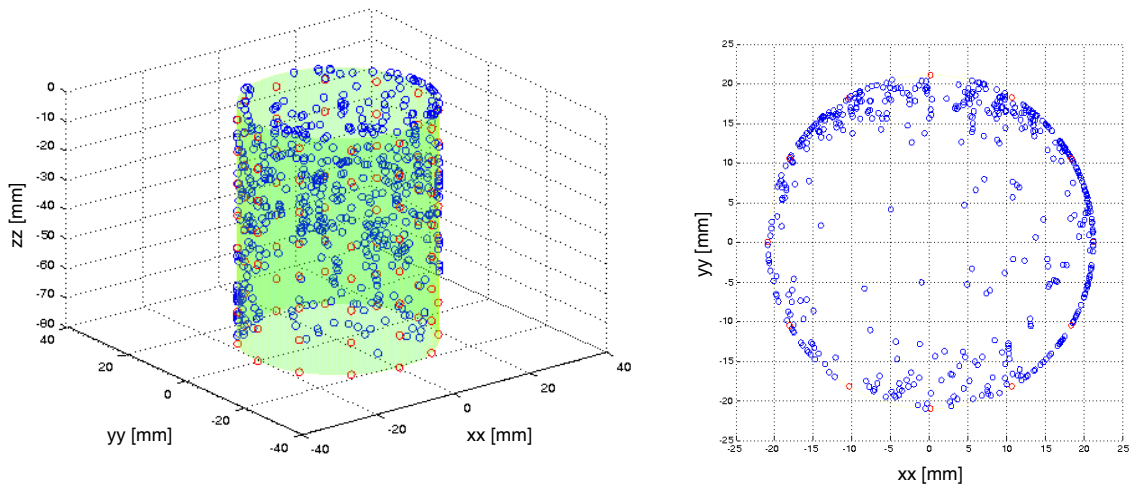


Figura 30 - Localização dos eventos de treino do espécimen PVT1 utilizando a rede neuronal artificial treinada com os eventos de treino do espécimen PVT2.

O erro da localização foi definido como a distância euclidiana entre a origem conhecida e a localizada. Nas Figuras 31 e 32 podemos ver a distribuição do erro de localização em cada uma das variáveis num gráfico de frequências. O erro médio na aproximação das coordenadas x, y e z é respectivamente 22.8 mm, 13.1 mm e 9.5 mm sendo o erro direto máximo associado à incerteza dos sensores que possuem um diâmetro de 15 mm.

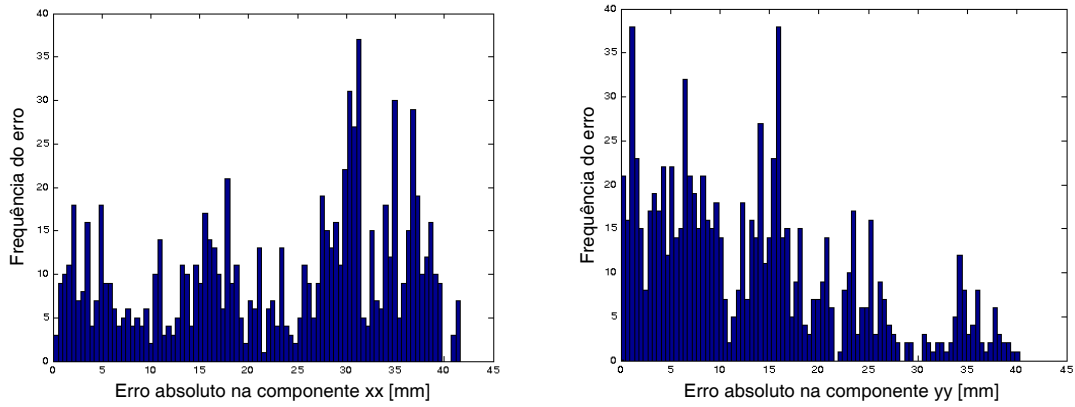


Figura 31 - À esquerda o histograma dos erros de localização para a coordenada x, à direita o histograma dos erros de localização para a coordenada y.

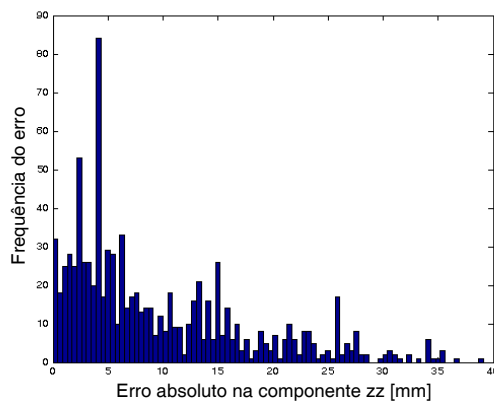


Figura 32 - Histograma dos erros de localização na coordenada z.

3.5 Resultados da localização

Todos os provetes foram fotografados depois do ensaio e os dados das emissões acústicas depois de processados são projetados nas fotografias. Assim é possível comparar a posição dos eventos localizados relativamente às fracturas finais. As Figuras 33, 34 e 35 são exemplos representativos de ensaios feitos com confinamentos de 1 MPa, 2 MPa e 3 MPa respectivamente.

Na Figura 33 está um exemplo de uma localização feita para um ensaio com 1 MPa de confinamento radial e axial. Foram possíveis localizar 156 dos 404 eventos detetados. O número total de eventos detetados é determinado pelo sensor que mais eventos deteta ao longo do ensaio. Assim neste caso foi possível localizar cerca de 38.6% dos eventos detetados.

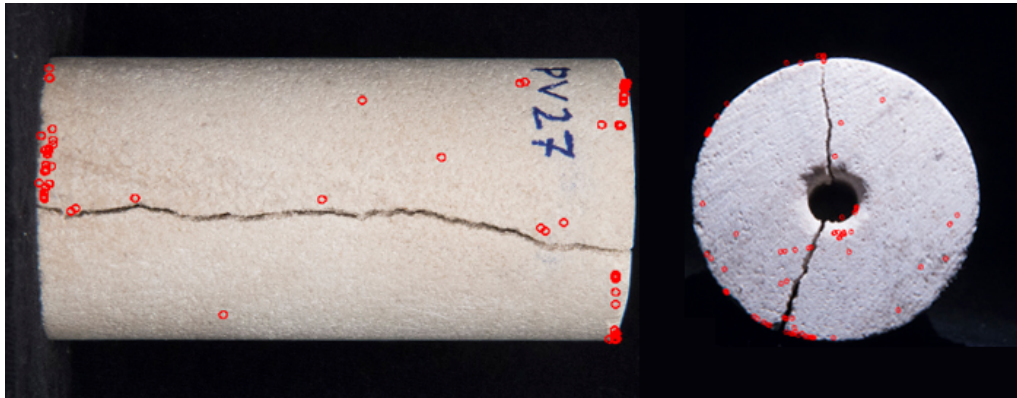


Figura 33 - Localização dos eventos acústicos no ensaio do espécimen PV27, com confinamento radial externo e axial a 1 MPa.

Na Figura 34 está um exemplo de uma localização feita para um ensaio com 2 MPa de confinamento radial e axial. Foram possíveis localizar 211 dos 373 eventos detetados. Tendo a razão entre os eventos detetados e localizados sido de 56.6%.

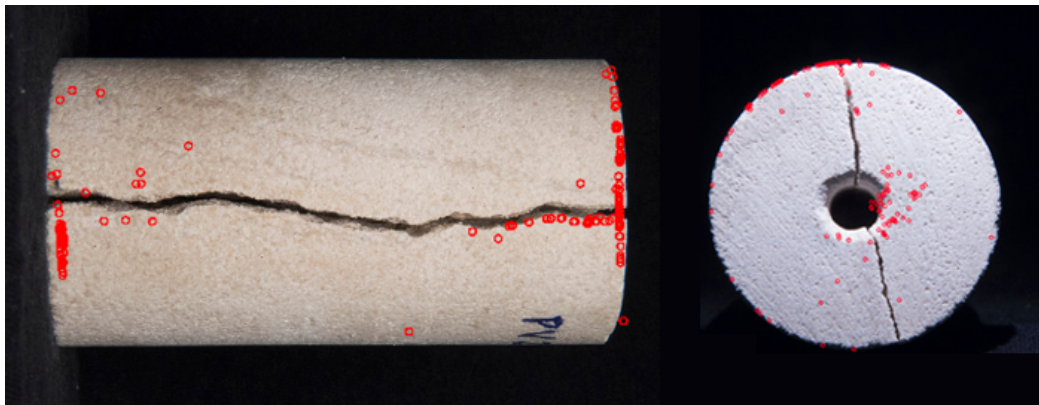


Figura 34 – Localização dos eventos acústicos no ensaio do espécimen PV28, com confinamento radial externo e axial a 2 MPa.

Na Figura 35 está um exemplo de uma localização feita para um ensaio com 3 MPa de confinamento radial e axial. Foram possíveis localizar 484 dos 768 eventos detetados. Tendo a razão entre os eventos detetados e localizados sido de 63.0%.

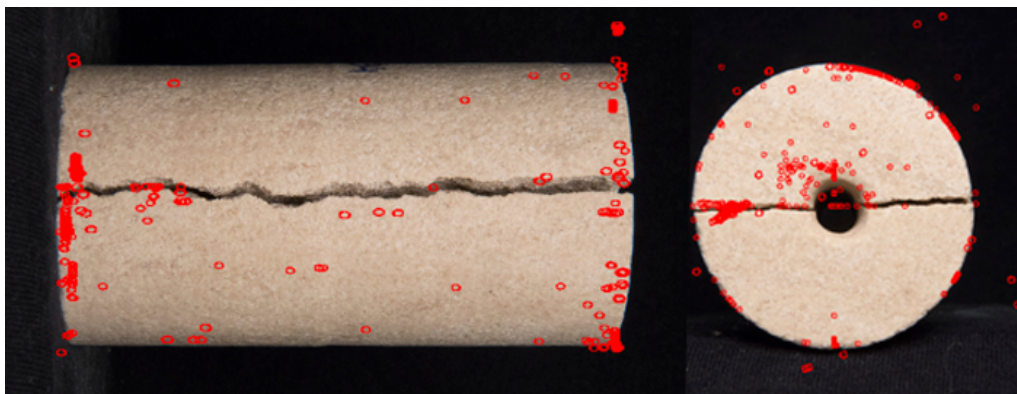


Figura 35 - Localização dos eventos acústicos no ensaio do espécimen PV34c, com confinamento radial externo e axial a 3 MPa.

A localização da origem dos eventos acústicos para os restantes ECO realizados podem ser consultadas nos Anexos.

Analisando o gráfico da Figura 36 nota-se que a este aumento da percentagem de eventos localizados é generalizado.

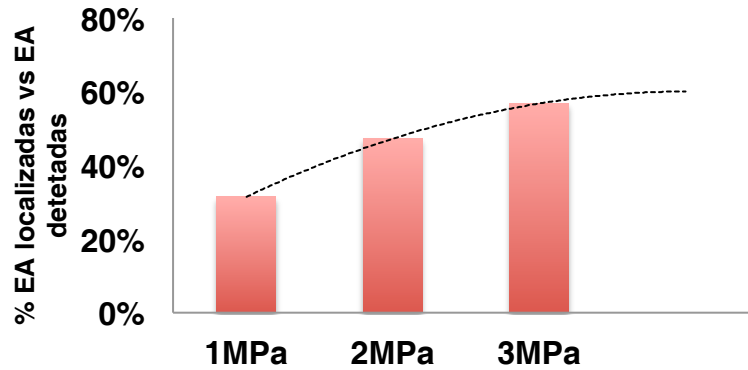


Figura 36 - % EA localizadas vs EA detetadas por confinamento.

Uma outra análise interessante é verificar que a percentagem de EA localizadas não aparenta depender da matriz da rocha e da micro-fracturação pré-existente, como se pode verificar na Figura 37. Os provetes PV26, PV27, PV28 e PV29 foram retirados do mesmo bloco, sendo o mesmo verdade para os pares PV30, PV31, PV32 e PV34c e também para PV35, PV36, PV37, PV38, PV39 e PV40. O espécimen PV25 pertence a uma outra série de espécimens nos quais ocorreram erros na aquisição de dados.

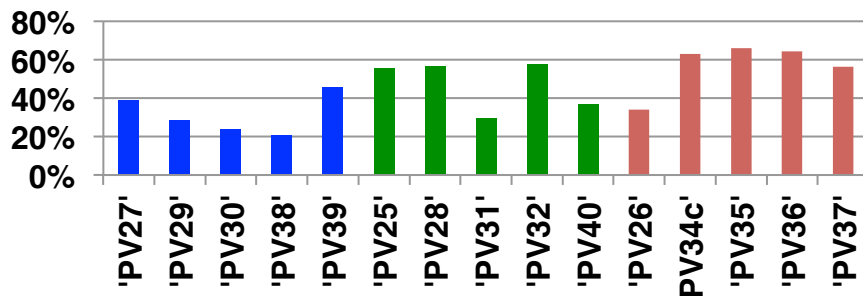


Figura 37 - % EA localizadas vs. EA detetadas por blocos.

4 Simulação RFPA e Análise das Energias

O software Rock Failure Process Analysis 2D, RFPA2D, da Mechsoft, China é um software de simulação numérica capaz de simular o processo de rotura em espécimens de rocha. Elegeu-se este software pela sua reconhecida capacidade de simular o comportamento heterogéneo da rocha natural. Uma vez que a heterogeneidade tem reconhecida influência na rotura da rocha, um software capaz de a simular é a escolha natural.

Embora o software trabalhe sobre um plano bidimensional, para efeitos de simulação e distribuição da carga, este assume que existe uma terceira componente espacial ainda que muito pequena. Isto possibilita que a cada elemento da matriz de simulação seja atribuído um volume unitário que possibilita os cálculos para a redistribuição da tensão. Podemos então considerar que a simulação da rotura é feita ao longo de uma superfície a que chamamos plano de rotura e que corresponde à superfície formada pela coalescência das micro em macro fracturas que formam o perfil de rotura.

O software altera as condições de tensão a que a matriz está sujeita a cada passo iterativo. A forma como esta alteração é feita é configurável, tendo-se para o caso optado por um incremento unitário (1 MPa) da pressão a cada iteração. Com o aumento da pressão e conseqüente aumento da tensão exercida nos nódulos estes são levados à rotura ficando incapazes de transmitir tensão aos demais nódulos. Nesta situação o software procede a uma redistribuição da tensão o que pode levar à rotura de outros nódulos, repetindo-se o processo até que seja atingido um novo equilíbrio. Cada redistribuição dentro do mesmo valor de pressão é um *step*, uma iteração dentro de uma iteração. O programa cria um ficheiro .bmp (bitmap) para cada estado final de *step*. Assim é possível obter a localização de todos os eventos ocorridos durante cada *step*. É também criado um relatório que resume dados estatísticos sobre a simulação, todavia com detalhe ao passo iterativo e não ao *step*.

Para representar e simular o ensaio em RFPA2D, constituiu-se uma matriz de 180 por 84 nódulos ou elementos, cada um dos quais contendo um conjunto de parâmetros mecânicos de distribuição aleatória e de dimensões 0.25 mm^2 . As dimensões da matriz e dos seus elementos refletem o facto de se pretender representar a heterogeneidade à escala do grão, tendo este um diâmetro aproximado de 0.5 mm. Os parâmetros mecânicos em cada nódulo são dados por funções definidas $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$, com distribuição de Weibull e do tipo da descrita na Equação 24:

$$f(x, \lambda, m) = \begin{cases} \frac{m}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{m-1} e^{-(x/\lambda)^m}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad [24]$$

A forma desta distribuição depende essencialmente do parâmetro adimensional $m \in \mathbb{R}^{0+}$, denominado neste caso por parâmetro de heterogeneidade, e pelo parâmetro característico λ , cujas unidades são idênticas às do parâmetro mecânico simulado. Cada nódulo em si é homogéneo e as propriedades mecânicas constantes.

A matriz é composta por 3 conjuntos distintos:

O primeiro conjunto representa os topos e pretende simular o comportamento do aço dos êmbolos. Para efeito da simulação considerou-se que o aço utilizado nos êmbolos é o AISI A514 de grau B, (AZO Materials, 2013). As propriedades mecânicas, que os autores do software consideram, que têm relevância para a simulação são:

a resistência à compressão (σ_c), com 760 MPa;

o coeficiente de Poisson (ν), de 0.28;

e o módulo de Young (E), com 210 GPa.

Logo, estes são os valores de referência a atribuir ao parâmetro característico λ . Uma vez que o aço é um material homogêneo, os valores para m foram arbitrados para os três igual a 100, uma vez que para $m = 100$ o valor de todos os nódulos orbita muito perto em volta do valor característico λ . A razão C/T é definida como o quociente da resistência à compressão pela resistência à tração, no caso do aço igual a 1.

O segundo conjunto pretende simular o furo do cilindro oco, cavidade, cujas propriedades não dependem de uma função de distribuição e incluem a pressão interna inicial bem como o incremento de pressão ao longo do ensaio, constante e sempre igual a 1 MPa por ciclo iterativo.

O último conjunto é a simulação da matriz da rocha. Para este conjunto os parâmetros λ e m foram inicialmente aproximados por critérios heurísticos e afinados por retro-análise. Findo este processo os parâmetros λ para a σ_c , ν e E ficaram em 120 MPa, 0.27 e 82.4 GPa.

Os valores de m variam consoante o valor das tensões de confinamento. Para a simulação com tensões de confinamento de 1 MPa os parâmetros m para σ_c , E e ν foram, respetivamente, 2.9, 3.4 e 100. Considerando-se por tanto que a razão entre as deformações não se altera com o aumento das tensões de confinamento e é constante ao longo de todo o provete. Para 2 MPa e 3 MPa os parâmetros m para σ_c , E são 2.9, 2.8 e 3.6, 3.6.

4.1 Simulações dos ECO em RFPA

Por forma a visualizar a progressão da emissão de EA apresenta-se para cada simulação 3 *steps*, a 33%, 66% e 100% da tensão de rotura respectivamente (como se pode verificar na Tabela 3). Na Figura 38 apresenta-se a simulação obtida para 1 MPa, na Figura 39 para 2 MPa e na Figura 41 para 3 MPa. A escala de energia usada na representação das EA muda, para cada simulação, a cada iteração pelo que esta é fornecida abaixo para cada *step*, como na Figura 38. Não foi possível encontrar qualquer correlação entre escalas de energia de simulações diferentes, embora a unidade de energia seja sempre o Joule, o que impossibilita a comparação visual entre simulações.

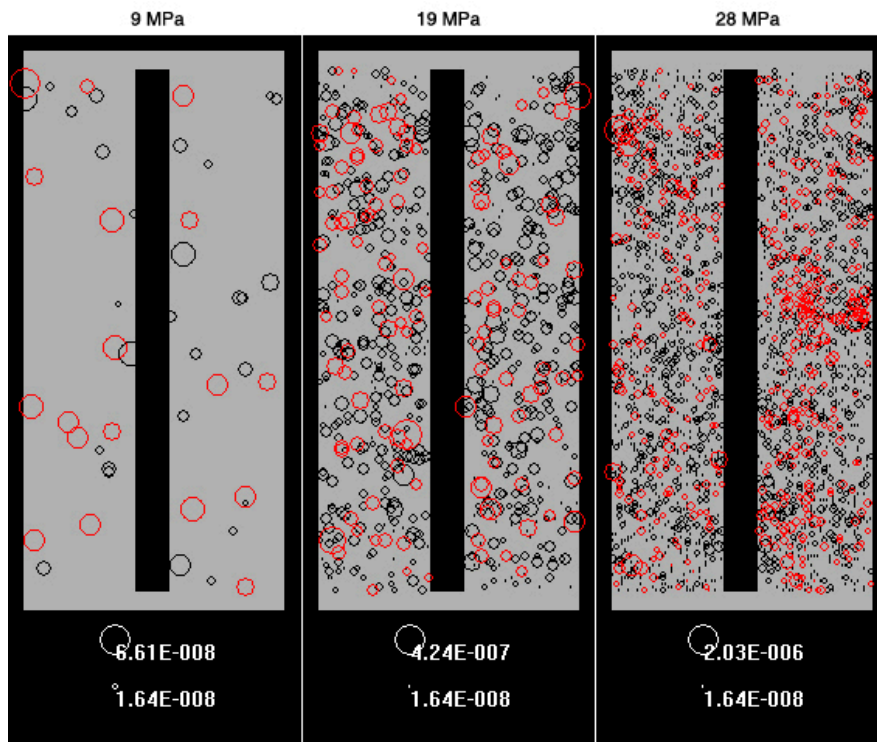


Figura 38 - Simulação RFP2D para o ensaio com 1 MPa de confinamento axial e radial.

De facto, mesmo entrando em conta com os eventos dos ensaios que, embora detetados não eram localizáveis existe uma discrepância considerável entre a escala da contagem de eventos. À primeira vista destaca-se mais do que a qualidade das emissões simuladas a sua quantidade.

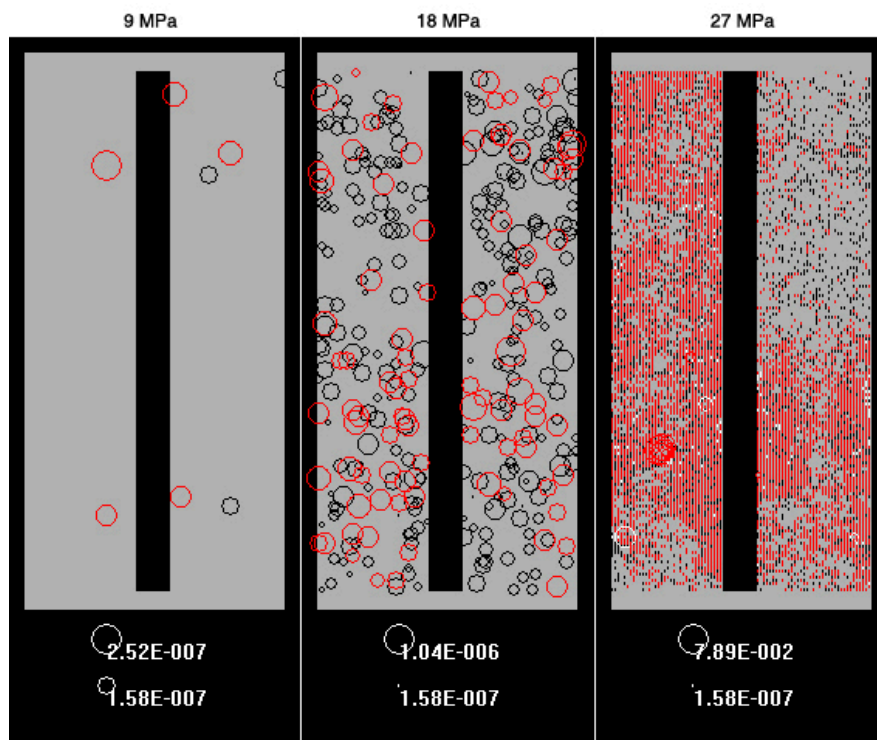


Figura 39 - Simulação RFP2D para o ensaio com 2 MPa de confinamento axial e radial.

Nesta simulação foi possível recriar o perfil de rotura mais comum entre os ensaios, (a progressão desta simulação completa pode ser consultada nos Anexos). A rotura total de um dos lados e apenas parcial do outro verificou-se na maioria dos ensaios em laboratório como exemplificado na Figura 40. Este fenómeno é perceptível devido à injeção do fluido após a rotura franca quando as arestas da fratura cortam a mangueira de pressão interna.



Figura 40 – Fotografias dos ensaios PV32 e PV34c tiradas imediatamente após o ensaio.

Todavia este não é o caso geral. No âmbito do trabalho foram feitas, no total das várias condições de confinamento, mais de duas centenas de simulações RFPA, no entanto o número de simulações que produziu perfis de rotura como os da Figura 38 representa menos de 5% da amostra.

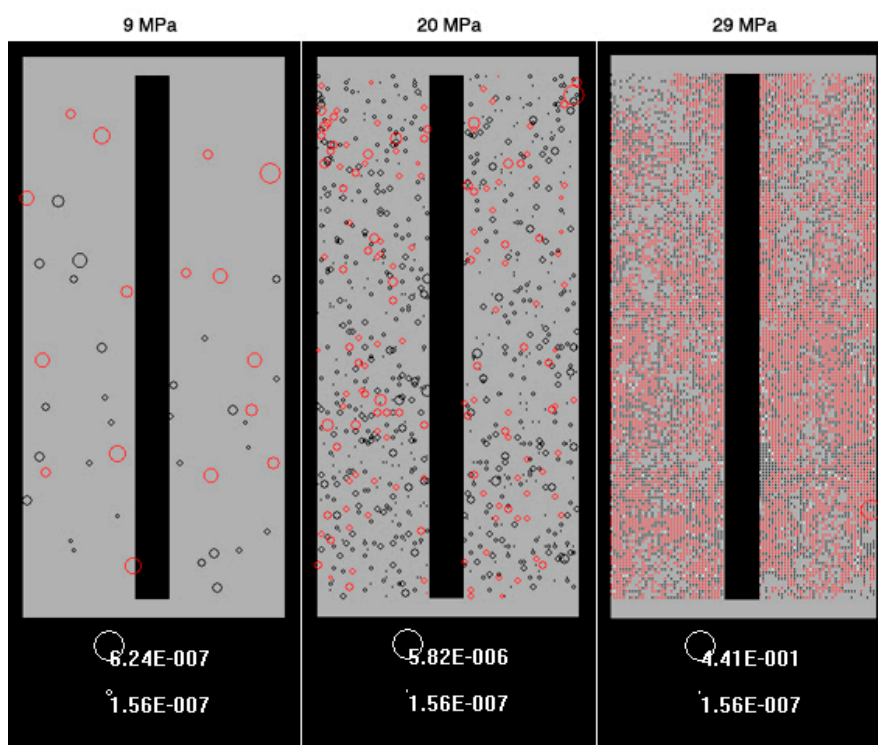


Figura 41 – Simulação RFPA2D para o ensaio com 3 MPa de confinamento axial e radial.

É possível contudo notar que existe uma clara diferenciação a nível das energias entre simulações para as diferentes tensões de confinamento, quando se ultrapassam os dois terços do valor da carga de

rotura. As simulações para tensão de confinamento a 1 MPa produziram EA simuladas cujos valores máximos para a energia são da ordem de 10^{-6} J, para 2 MPa e 3 MPa estes valores são da ordem de grandeza de 10^{-2} J e 10^{-1} J, respectivamente, o que constitui uma variação considerável. Por este motivo procedeu-se ao tratamento dos dados das energias dos ensaios laboratoriais.

4.2 Perfis Energéticos das Simulações RFPA

Os gráficos das Figuras 42, 43 e 44 representam os perfis energéticos das simulações RFPA com tensões de confinamento axial e radial de 1 MPa, 2 MPa e 3 MPa respectivamente.

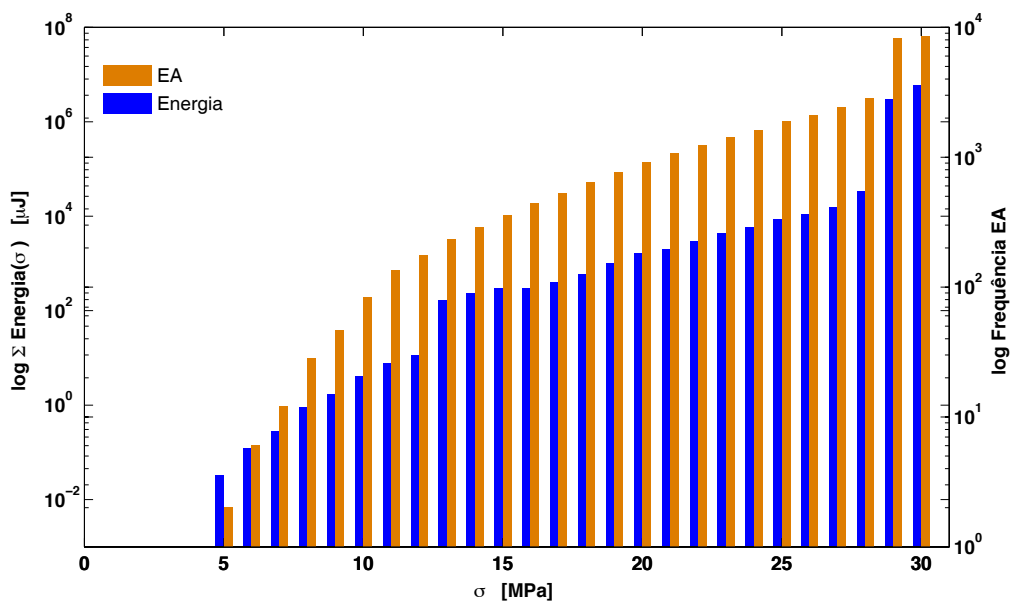


Figura 42 - Perfil Energético da Simulação RFPA2D para confinamento a 1 MPa.

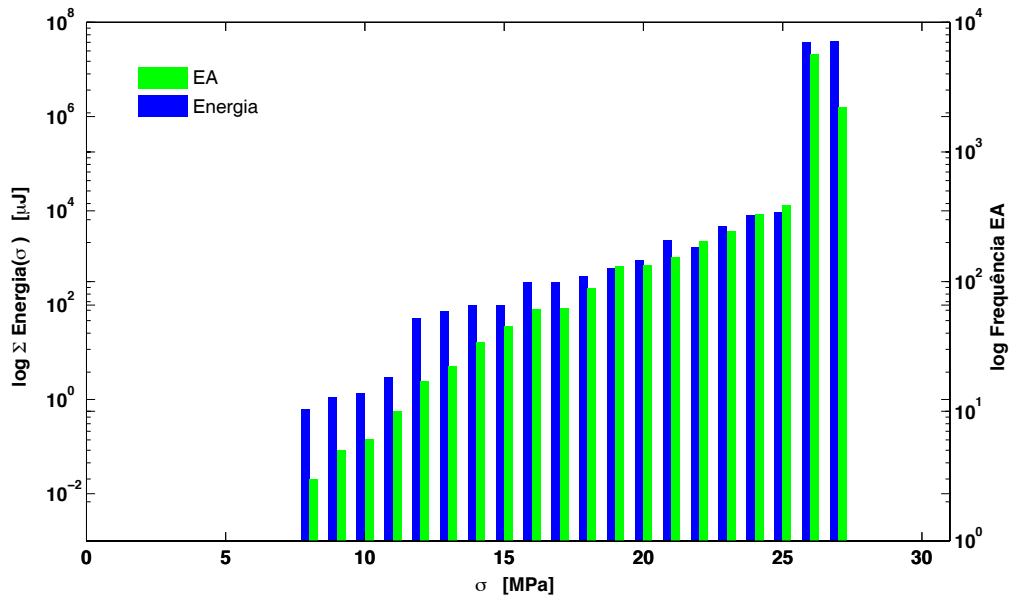


Figura 43 - Perfil Energético da Simulação RFPA2D para confinamento a 2 MPa.

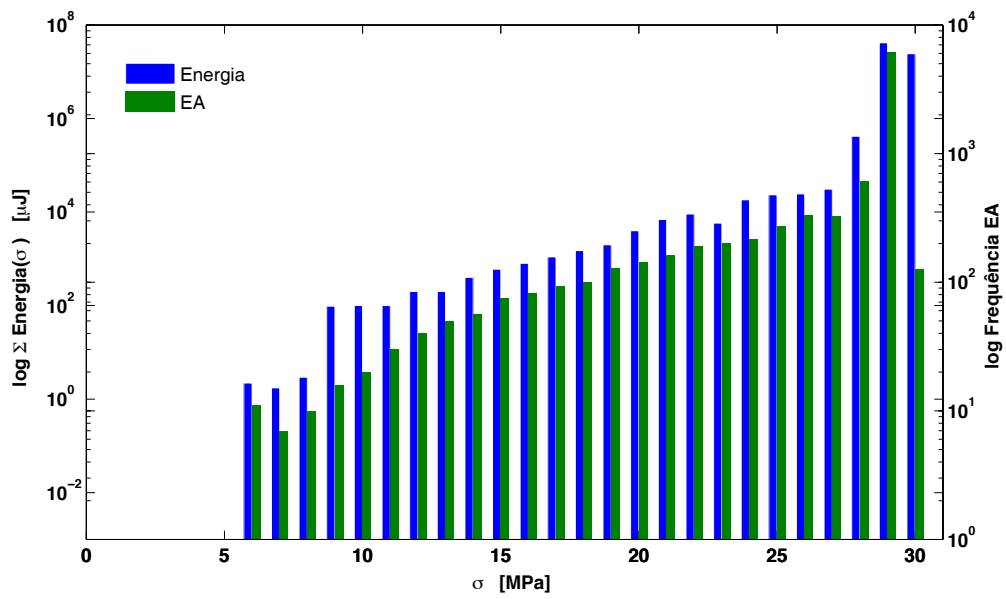


Figura 44 - Perfil Energético da Simulação RFPA2D para confinamento a 3 MPa.

A análise dos gráficos permite identificar que existem semelhanças nos perfis energéticos de todas as simulações. O gráfico da Figura 45 evidencia esta semelhança e realça duas tendências:

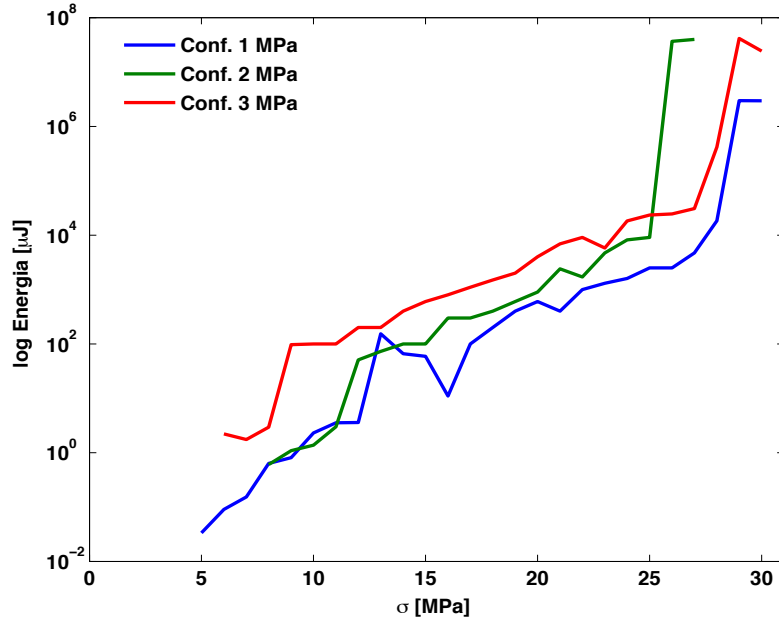


Figura 45 – Energia das simulações RFA.

É evidente que para as três tensões de confinamento existem dois degraus de aumento abrupto da energia liberta pelas EA, um no início das emissões e outro na rotura. Entre os degraus todas as simulações aparentam entrar num patamar onde o aumento médio da energia é gradual e aproximadamente constante, rondando os 700 μJ por MPa de incremento da pressão. Sendo estas características comuns às três podemos estar na presença de uma assinatura energética da simulação do ensaio. Além disto, a energia das emissões da simulação para 2 MPa de confinamento são quase perfeitamente enquadradas pelas restantes, sendo isto particularmente evidente na Figura 45. Tal é indicativo da influência das tensões de confinamento na energia de rotura dos elementos.

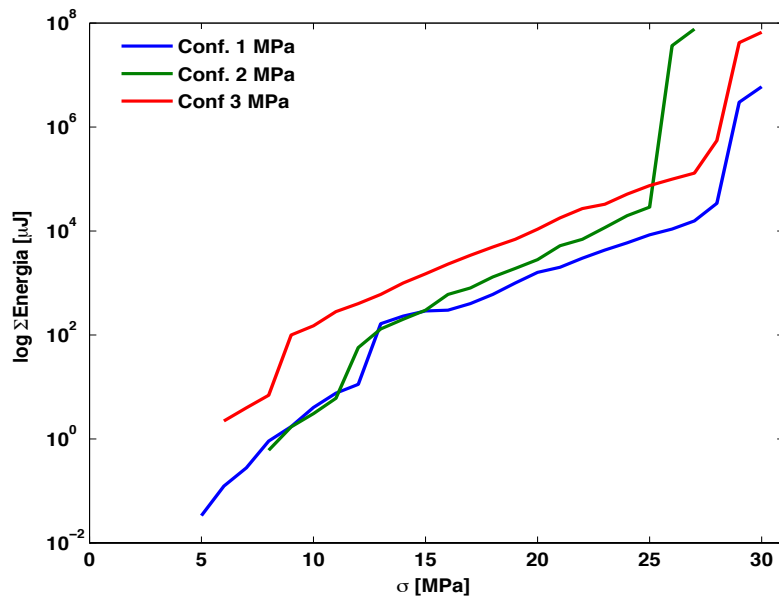


Figura 46 – Energia acumulada das simulações RFA.

Nota-se também que quanto maior a tensão de confinamento maior a pressão necessária para que tenha início a emissão de eventos acústicos e menor a pressão de rotura do provete, isto é, uma compressão da faixa de pressões em que ocorrem as EA. Na figura 47 onde se pode ver a contribuição média de cada EA para a energia total ao longo do ensaio, é possível mais uma vez verificar que o confinamento tem de facto influência nos níveis energéticos das EA.

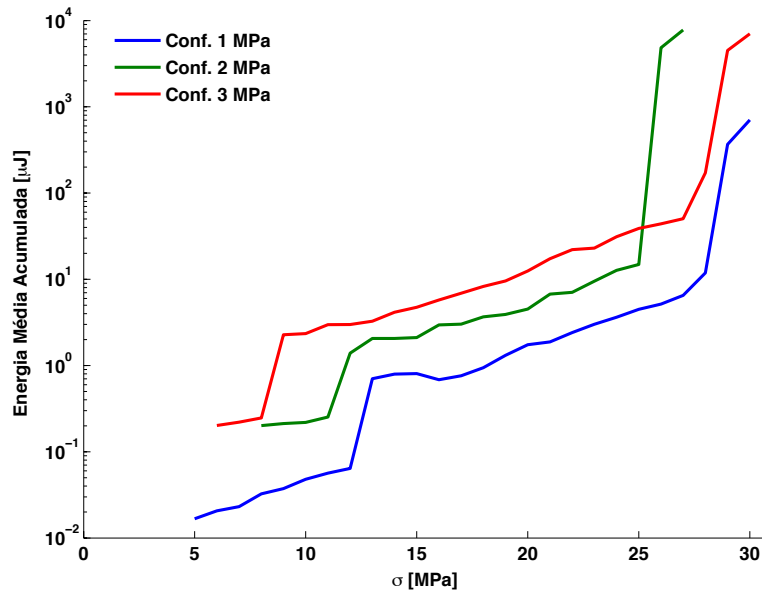


Figura 47 – Energias médias acumuladas (RFPA).

É particularmente evidente que ao longo do ensaio a energia média liberta por cada EA cresce exponencialmente. A Figura 47 demonstra que também o rácio desse crescimento é potenciado pelo aumento das tensões de confinamento.

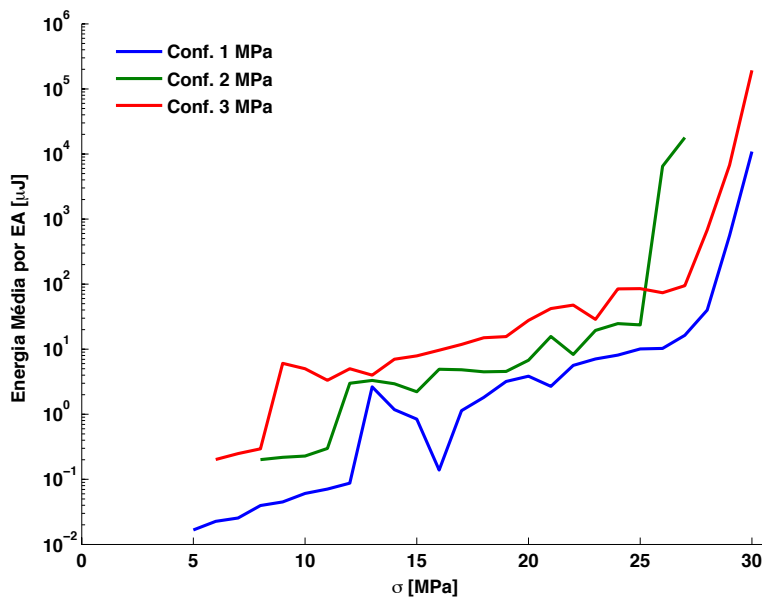


Figura 48- Energia média por EA (RFPA).

A comparação do gráfico da Figura 47 com os das anteriores mostra que embora o numero de eventos caia drasticamente no pós ruptura a energia libertada é praticamente idêntica à liberta na rotura.

4.3 Perfis Energéticos dos Ensaio Laboratoriais

Os perfis energéticos dos ensaios representativos de 1 MPa (PV27), de 2 MPa (PV28) e de 3 MPa (PV34c) apresentados nas Figuras 49, 50 e 51, respectivamente, permitem ver que existe de facto uma discrepância entre os resultados da simulação e os resultados laboratoriais.

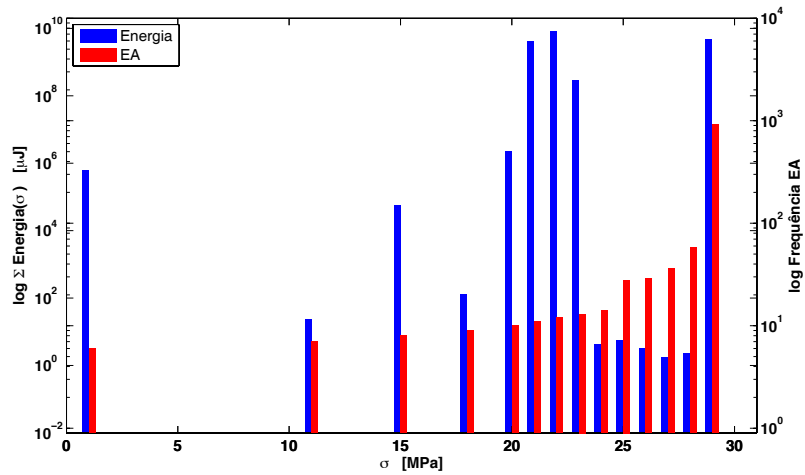


Figura 49 - Perfil Energético do ensaio laboratorial sobre o especimen PV27 com tensão de confinamento de 1 MPa.

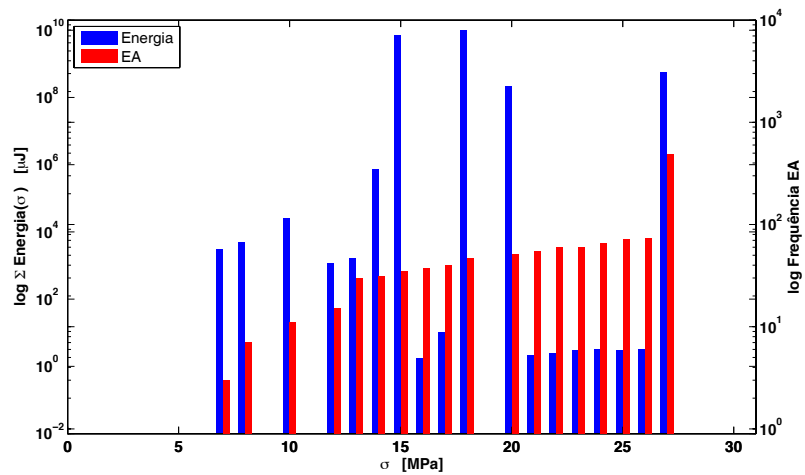


Figura 50 - Perfil Energético do ensaio laboratorial sobre o especimen PV28 com tensão de confinamento de 2 MPa.

De facto embora seja possível encontrar ligeiras semelhanças ao nível dos perfis das EA, nomeadamente na monotonia constante para as tensões de confinamento a 1 e 2 MPa, estas terminam aqui.

Os perfis energéticos laboratoriais apresentam comportamentos bastante diversos das suas simulações em RFPA. Desde já a clara descontinuidade ao longo do incremento de carga ao passo que nas simulações a ocorrência de EA é contínua ao longo da simulação. Por outro lado a variabilidade da monotonia que é extremamente complexa nos perfis energéticos dos ensaios laboratoriais e a qual não tem qualquer expressão nos resultados das simulações RFPA. Por fim a gama das energias emitidas. Embora em ambos os casos a quantidade de eventos detectados seja da ordem dos milhares de eventos, milhares em laboratório dezenas de milhar em RFPA, a energia libertada nos ensaios laboratoriais é da ordem de $10^9 \mu\text{J}$ ao passo que na simulação os valores acumulados são da ordem de grandeza de $10^7 \mu\text{J}$.

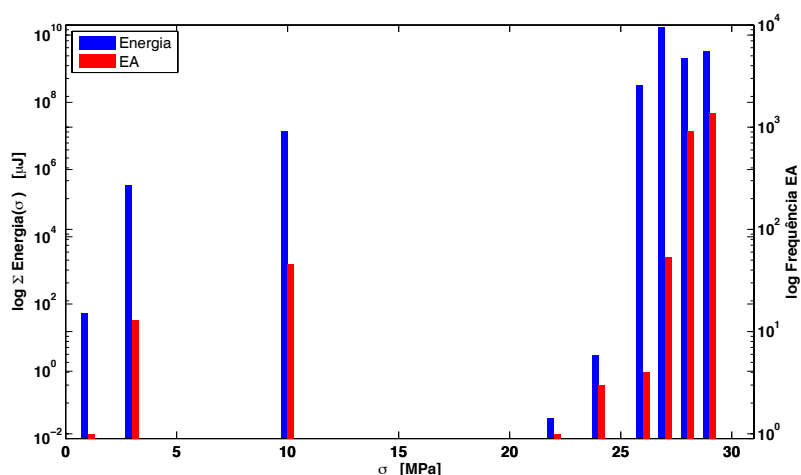


Figura 51 - Perfil Energético do ensaio laboratorial sobre o espécimen PV34c com tensão de confinamento de 3 MPa.

A figura 51 destaca os perfis das energias médias libertas por evento acústico detetado, ao longo dos ensaios. Nota-se que os três ensaios apresentam quatro picos de energia, que em todos os casos apenas coincidem com picos de emissões na pressão de rotura. Nota-se também que existe uma semelhança com as simulações RFPA na medida em que, também em laboratório foram os ensaios com 2 MPa que demonstraram ter a menor faixa de atividade de EA.

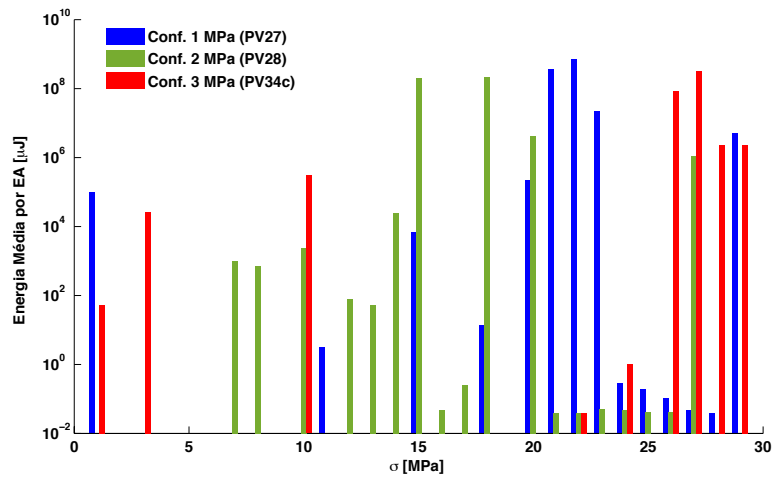


Figura 52 – Energia média por EA (Laboratório).

Nota-se também que após cada pico de energia as emissões que se lhe seguem são particularmente fracas, mesmo que geralmente em maior número.

Para tentar compreender a origem deste comportamento dos perfis energéticos dos ensaios laboratoriais explora-se com maior detalhe a distribuição energética das EA. Essa distribuição é representada por meio de um histograma bivariado das energias ao longo do incremento da tensão radial interna, e é apresentada nas Figuras 52, 53 e 54 para os ensaios de referencia a 1, 2 e 3 MPa de confinamento respectivamente. Os histogramas da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, para os restantes ECO realizados, com EA localizadas, podem ser consultadas nos Anexos.

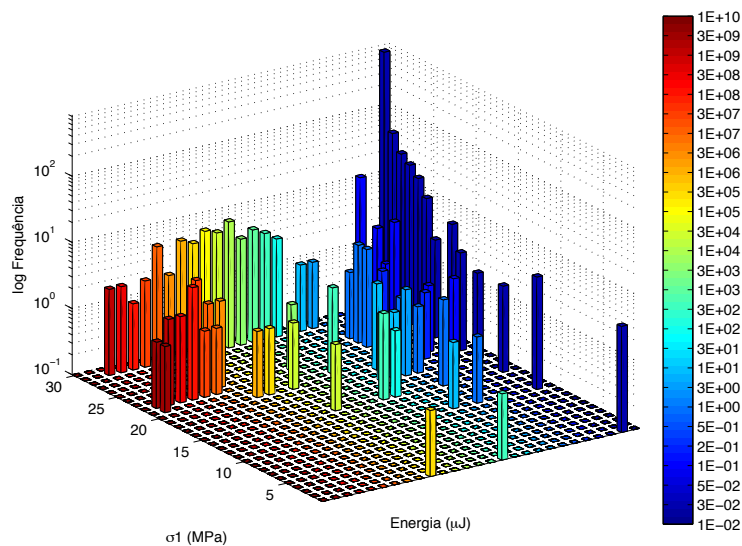


Figura 53 – Histograma da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, espécimen PV27 ensaiado com confinamento radia e axial de 1 MPa.

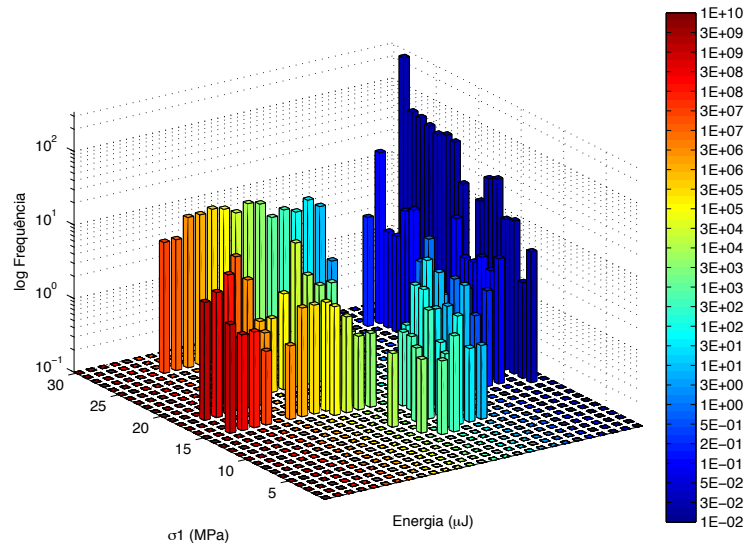


Figura 54 – Histograma da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, especimen PV28 ensaiado com confinamento radia e axial de 2 MPa.

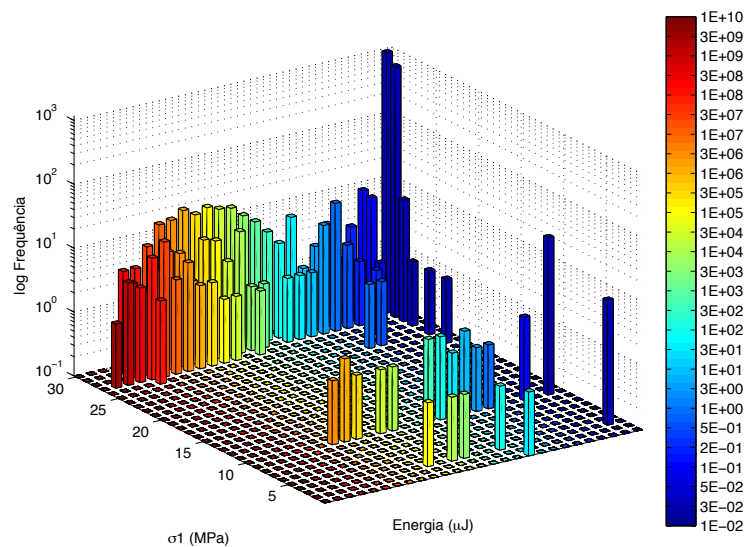


Figura 55 – Histograma da distribuição energética das EA por incremento de tensão radial interna, especimen PV34c ensaiado com confinamento radia e axial de 3 MPa.

Notam-se varias tendências esclarecedoras. A primeira é que à medida que a carga vai aumentando durante o ensaio não só a frequência de eventos com maior energia aumenta, como também as energias desses eventos aumentam. Por outro lado nota-se que analisando todo o ensaio e percorrendo o mesmo ao longo do eixo das energias é possível notar em volta das descontinuidades de detecção de EA que estas descontinuidades aumentam no sentido do aumento da energia e diminuem no sentido contrário. Uma outra constatação é a clara existência de uma assinatura energética da rotura repetida em todos os ensaios confirmando a tendência verificada nas simulações.

5 Conclusões

É possível tirar-se conclusões nas duas dimensões a que este trabalho se propunha investigar. Em primeiro lugar relativamente à localização de eventos acústicos em volumes de geometria complexa:

Conclui-se que, quanto à qualidade, a metodologia desenvolvida para a localização da origem de emissões acústicas em ensaios laboratoriais sobre cilindros ocos produz resultados com boa concordância com a verificação visual. Os erros obtidos na localização são aceitáveis, considerando o erro inerente aos sensores. Consequentemente conclui-se que o desempenho da metodologia melhora com a utilização de sensores menores.

Conclui-se ainda, quanto à quantidade, que a metodologia beneficiaria consideravelmente da implementação de um filtro de frequências passa baixo no amplificador em conjunto com um filtro passa alto na drive ou já programado no software. Tal permitiria eliminar as duas componentes do ruído identificado e, por conseguinte, aumentar a detecção de eventos e também a taxa de emparelhamento dos mesmos. As localizações produzidas permitem ter boas indicações das áreas com maior incidência de EA bem como aproximar a direção do perfil da fractura final.

Quanto à eficiência do algoritmo de localização esta aparenta melhorar com o aumento da magnitude das tensões de confinamento.

Quanto à fraturação, foi possível concluir que a forma da rotura é essencialmente função da geometria do ensaio e das características da matriz da rocha e da sua micro-fraturação. De facto para as três condições de confinamento testadas o perfil final da rotura é muito semelhante, pelo que a magnitude das tensões de confinamento aplicadas não aparenta ter qualquer influencia na forma da rotura.

Por outro lado a distribuição energética das roturas elementares que conduzem à fraturação tem uma maior dependência da magnitude das tensões de confinamento do que da micro-fraturação pré-existente. Foi também constatado que a probabilidade de um evento, tendo sido detetado, ser localizado é função tanto da matriz da rocha como das condições de fronteira do ensaio, sendo no entanto o peso desta última dependência maior. Isto explica o porquê do aumento da magnitude do confinamento aumentar a eficiência do algoritmo de localização.

Quanto à capacidade de o software de simulação de rotura de rocha RFPA simular o ECO conclui-se que o desempenho não é satisfatório. Tendo sido a intenção dos autores a de simular a variabilidade das propriedades mecânicas da rocha, a forma como essa variabilidade é introduzida impossibilita a obtenção de resultados consistentes. De facto o software é capaz de simular o perfil de rotura verificado em laboratório, mas a probabilidade de o fazer num conjunto de simulações independentes e com os mesmos parâmetros é cerca de 5%. Conclui-se no entanto pela comparação entre as simulações e os resultados laboratoriais que a variabilidade das propriedades mecânicas da matriz da rocha é fortemente anisotrópica, pelo que a implementação de um parâmetro para definir essa anisotropia no algoritmo de RFPA beneficiaria grandemente o seu desempenho.

A simulação em RFPA foi contudo capaz de simular uma aparente assinatura energética do ensaio, onde se observam abruptos aumentos da energia média liberta por EA. Este comportamento foi de facto observado, ainda que com perfis mais complexos, nos ensaios laboratoriais. Existem claramente, em cada ensaio, 4 zonas de carga onde se verifica que a energia média por EA aumenta abruptamente, para depois voltar diminuir.

As cargas a que estes fenómenos ocorrem variam de ensaio para ensaio independentemente do confinamento. Assim conclui-se que a distribuição deste comportamento é essencialmente função da matriz da rocha e da sua micro-fracturação pré existente. Pelo que poderá ser uma forma de avaliar a heterogeneidade das propriedades mecânicas da matriz da rocha.

Quanto à natureza deste fenómeno conclui-se que poderá ter a seguinte explicação: Uma vez que o ECO é realizado sob um cilindro oco o aumento do confinamento triaxial potencia a deformação do material junto das superfícies externas e internas do provete. Assim, parte da energia que de outra forma seria liberta como uma EA detetável, é despendida na deformação do material. Os eventos acústicos resultantes destas roturas têm energias mais baixas que aqueles ocorridos no interior do espécimen, pelo que a probabilidade de serem detetados diminui com o aumento da carga.

Por outro lado a deformação destes elementos promove a concentração das tensões em elementos no interior do provete, com maior resistência. Estes por sua vez ao romperem com o aumento da tensão emitem EA com energias elevadas e forçam uma redistribuição rápida da tensão pelos elementos circundantes, explicando-se assim o motivo pelo qual a energia média das EA decresce após cada aumento abrupto.

6 Trabalhos Futuros

Relativamente a investigações futuras sugerem-se as seguintes:

Sendo que o erro de localização conseguido com a metodologia proposta neste trabalho é tão próxima do erro dos sensores e que a probabilidade da deteção de uma EA diminui com a diminuição da superfície de acoplamento e geometria do espécimen, seria interessante realizar uma análise de optimização das dimensões dos sensores.

O erro na primeira componente das coordenadas das EA localizadas aparenta estar relacionado com a simetria da posição dos sensores. Assim, seria interessante investigar configurações não simétricas para a posição dos sensores com o intuito de promover a diminuição nesta componente do erro de localização.

Seria também interessante realizar estes ensaios medindo as deformações resultantes do carregamento interno, por incremento de carga, com o intuito de as comparar com o número de emissões acústicas e a sua energia.

7 Bibliografia

- Adams, F. D. (1912). An Experimental Contribution to the Question of the Depth of the Zone of Flow in the Earth's Crust. *The Journal of Geology*, 20(2), 97–118. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/30061358>
- Alsayed, M. . (2002). Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(3), 355–366. doi:10.1016/S1365-1609(02)00030-8
- AZO Materials. (2013). AISI A514 Grade B Alloy Steel (UNS K11630). Retrieved from <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6737>
- Barla, G. (Polytechnic/Turin), Bertacchi, P. (ENEL/Milan), Rossi, P. P. (ENEL/Milan), & Vielmo, I. (CONSONDA/Milan). (1986). Hydraulic fracturing testing method for rock stress measurement in Italy.pdf. In *International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements*. Stockholm.
- Baxter, M. G., Pullin, R., Holford, K. M., & Evans, S. L. (2007). Delta T source location for acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(3), 1512–1520. doi:10.1016/j.ymsp.2006.05.003
- Beatttie, A. (1983). Acoustic emission, principles and Instrumentation. *Journal of AE*, 2(1/2), 95–128.
- BP plc. (2012). *Unconventional gas and hydraulic fracturing*.
- Byerlee, J. D., & Lockner, D. (1977). Acoustic Emission During Fluid Injection. In *First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geological Structures and Materials, The Pennsylvania State University, June 1975* (pp. 87–98). The Pennsylvania State University: Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Chugh, Y. P. (1968). *An Investigation of Frequency Spectra of Microseisms Emitted from Rock Under Tension in the Range 300-15,000 cps*. The Pennsylvania State University.
- Dinis da Gama, C. (IST/Lisbon). (2011). *True Triaxial Testing of Rocks*. (M. Kwaśniewski, X. Li, & M. Takahashi, Eds.).
- DONG, L., & LI, X. (2012). Three-dimensional analytical solution of acoustic emission or microseismic source location under cube monitoring network. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(12), 3087–3094. doi:10.1016/S1003-6326(11)61575-6
- Drouillard, T. (1996). A history of acoustic emission. *Journal of AE*, 14(1), 1–34.
- Drouillard, T. F. (1990). Anecdotal history of acoustic emission from wood. *Journal of AE*, 9(3), 155–176.
- European Commission. (2011). Europe 2020 – Europe's growth strategy. *Europa Website - Europe 2020*. doi:10.1016/j.resconrec.2010.03.010

- Fjær, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum Related Rock Mechanics* (2nd Editio.). Elsevier B. V., Developments in Petroleum Science 53.
- Förster, F., & Scheil, E. (1936). Akustische Untersuchung der Bildung von Martensitnadeln (Acoustic Study of the Formation of Martensile Needels). *Zeitschrift Für Metallkunde*, 28(9), 245–247.
- Grabec, I., & Sachse, W. (1989). Application of an intelligent signal processing system to acoustic emission analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85(3), 1226–1235.
- Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2008). *Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering [Hardcover]*. Springer; 2008 edition. Retrieved from <http://www.amazon.co.uk/Acoustic-Emission-Testing-Applications-Engineering/dp/3540698957>
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., & Beale, M. H. (1996). *Neural network design. Boston Massachusetts PWS* (Vol. 2). Retrieved from <http://ecee.colorado.edu/academics/schedules/ECEN5120.pdf>
- Hagan, M. T., & Menhaj, M. B. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6), 989–993. doi:10.1109/72.329697
- Handin, J., Heard, H. C., & Magouirk, J. N. (1967). Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperatures and strain rates. *Journal of Geophysical Research*, 72(2), 611–640.
- Hardy, H. R. J. (2005). *Acoustic Emission/Microseismic Activity: Volume 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications, Volume 1*. Retrieved from http://books.google.pt/books/about/Acoustic_Emission_Microseismic_Activity.html?id=Bt50nfeLFFcC&pgis=1
- Hayashi, S. H. D., Ligeró, E. L., & Schiozer, D. J. (2010). Risk mitigation in petroleum field development by modular implantation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 75(1-2), 105–113. doi:10.1016/j.petrol.2010.10.013
- Hensman, J., Mills, R., Pierce, S. G., Worden, K., & Eaton, M. (2010). Locating acoustic emission sources in complex structures using Gaussian processes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(1), 211–223. doi:10.1016/j.ymssp.2009.05.018
- Hobbs, D. (1962). The strength of coal under biaxial compression. *Colliery Engng.*
- Hoskins, E. R. (1969). The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 6, 99–125. doi:10.1016/0148-9062(69)90030-8
- Hsu, N. N. (1977). Acoustic Emissions Simulator. US Patent.
- HUSEN, S., KISSLINGE, FLUEH, E., & ASCH, G. (1999). Accurate hypocentre determination in the seismogenic zone of the subducting Nazca Plate in northern Chile using combined on-/offshore network. *Geophys J Int*, 138, 687–701.
- Ing, R. K., Quieffin, N., Catheline, S., & Fink, M. (2005). In solid localization of finger impacts using

- acoustic time-reversal process. *Applied Physics Letters*, 87(20).
- Islam, M. A., & Skalle, P. (2011). Calibration Of Rock Strength And Yielding By Using Hollow Cylinder Experimental Data. *45th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*.
- Kim, R. Y. (1971). *An Experimental Investigation of Creep and Microseismic Phenomena in Geologic materials*. The Pennsylvania State University.
- Kimble, E. J. J. (1984). Semiconductor Strain Gages as Acoustic Emission Transducers. In *Third Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*. The Pennsylvania State University: Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- King, G. E. (2012). Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. In *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*.
- King, L. V. (1912). On the Limiting Strength of Rocks under Conditions of Stress Existing in the Earth's Interior. *The Journal of Geology*, 20(2), 119–138. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/30061359>
- Kishinoue, F. (1990). An experiment on the progression of fracture (A preliminary report). *Journal of AE*, 9(3), 177–180.
- Kosel, T., Grabec, I., & Muzic, P. (2000). Location of acoustic emission sources generated by air flow. *Ultrasonics*, 38(1–8), 824–826.
- Kundu, T. (2014). Acoustic source localization. *Ultrasonics*, 54(1), 25–38. doi:10.1016/j.ultras.2013.06.009
- L'Hermite, R. (1960). Volume change of concrete. In *4th International Symposium on the Chemistry of Cement* (pp. 659–694). NBS Monograph 43.
- Labiouse, V., & Vietor, T. (2013). Laboratory and In Situ Simulation Tests of the Excavation Damaged Zone Around Galleries in Opalinus Clay. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 57–70.
- Marquardt, D. W. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. doi:10.1137/0111030
- Mazanti, B. B., & Sowers, G. F. (1966). Laboratory testing of rock strength. In *Testing techniques for rock mechanics* (pp. 207–227). Philadelphia: American Society of Testing Materials.
- Melikoglu, M. (2014). Shale gas: Analysis of its role in the global energy market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 460–468. doi:10.1016/j.rser.2014.05.002
- Mobley, K. et al. (1987). Survey of Commercial Sensors and Systems for Acoustic Emission Testing. In P. M. McIntire (Ed.), *Nondestructive Testing Handbook Vol:5* (pp. 513–549). Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive Testing.
- Narciso, J. M. F. (2015). *Previsão e modelação de pressão de poros utilizando velocidades sísmicas*.

- Obert, L. (1977). The Microseismic Method-Discovery and Early History. In *First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geological Structures and Materials, The Pennsylvania State University, June 1975* (pp. 11–12). Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Obert, L., & Stephenson, D. . (1965). Stress condition under which core discing occurs. *Transaction SME, 238*, 227–235.
- Papatulica, M. (2014). Arguments Pro and Against Shale Gas Exploitation Worldwide and in Romania. *Procedia Economics and Finance, 8*, 529–534. doi:10.1016/S2212-5671(14)00124-5
- Park, B., Sohn, H., Olson, S. E., DeSimio, M. P., Brown, K. S., & Derriso, M. M. (2012). Impact localization in complex structures using laser based time reversal. *Structural Health Monitoring: An International Journal, 11*(5), 57–588.
- Patel, T. (2011). France Vote Outlaws “Fracking” Shale for Natural Gas, Oil Extraction. *Bloomberg*.
- PAVLIS, G. L. (1986). Appraising earthquake hypocenter location errors: A complete, practical approach for single-event locations. *Bull Seimol Soc Am, 76*, 1699–1717.
- PAVLIS, G. L., & BOOKER, J. (1983). Progressive multiple event location (PMEL). *Bull Seismol Soc Am, 73*, 1753–1777.
- Pirani, S., Henderson, J., Honoré, A., Rogers, H., & Yafimava, K. (2014). *What the Ukraine crisis means for gas markets*.
- Pomeroy, C., & Hobbs, D. (1962). The fracture of coal specimens subjected to complex stresses. *Steel & Coal*.
- REYES-MONTES, J. M., RIETBROCK, A., COLLINS, D. S., & YOUNG, R. P. (2005). Relative location of excavation induced microseismicity at the underground research Laboratory (AECL Canada) using surveyed reference events. *Geophys Res Letts, 32*, 1–4.
- Ribay, G., Catheline, S., Clorennec, D., Ing, R. K., Quieffin, N., & Fink, M. (2007). Acoustic Impact Localization in Plates: Properties and Stability to Temperature Variation. *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL, 54*(2), 378–385.
- Robertson, E. C. (1955). Experimental Study of the Strength of Rocks. *Geological Society of America Bulletin*. doi:10.1130/0016-7606(1955)66[1275:ESOTSO]2.0.CO;2
- SAUSE, M. G. R. (2011). INVESTIGATION OF PENCIL-LEAD BREAKS AS ACOUSTIC EMISSION SOURCES. *Journal of AE, 29*, 184–196.
- Schofield, B. H. (1961). *Acoustic emission under applied stress*. Boston.
- Scruby, C. ., & Drain, L. . (1990). *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*. New York: Taylor & Francis. Retrieved from http://books.google.pt/books/about/Laser_Ultrasonics_Techniques_and_Applica.html?id=KgXPqx9ST-wC&pgis=1
- Senseny, P., Mellegard, K., & Wagner, L. (1989). Hollow Cylinder Tests on Natural Rock Salts. *ASTM*

Geotechnical Testing

- Sharma, V. M., & Saxena, K. R. (Eds.). (2002). *In-Situ Characterization of Rocks*. Lisse: A.A. Balkema Publishers.
- Sribar, R., & Sachse, W. (1993). An experimental investigation of the AE source location and magnitude on 2-D frame structures using intelligent signal processing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4).
- Staszewski, W. J., Lee, B. C., Mallet, L., & Scarpa, F. (2004). Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: Part 1 - Lamb wave sensing. *Smart Materials and Structures*, 14(2), 251–260.
- Talesnick, M. L., & Ringel, M. (1999). Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(5), 627–639. doi:10.1016/S0148-9062(99)00038-8
- U.S. Energy Information Administration. (2011). *Review of Emerging Resources: U.S. Shale Gas and Shale Oil Plays*. Washington, DC.
- Ulusay, R., & Hudson, J. A. (Eds.). (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, 2007.
- WALDHAUSER, F., & ELLSWORTH, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern hayward fault, California. *Bull Seism Soc Am*, 90(6), 1353–1368.
- Weijermars, R. (2013). Economic appraisal of shale gas plays in Continental Europe. *Applied Energy*, 106, 100–115. doi:10.1016/j.apenergy.2013.01.025
- WETTMANN, R. W. (2011). *GERMANY'S WITHDRAWAL FROM NUCLEAR ENERGY*. London.
- World Nuclear Association. (2014). Fukushima Accident. Retrieved July 7, 2014, from <http://www.world-nuclear.org/info/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident/>

Anexos

Desempenho do treino da Rede Neuronal Artificial

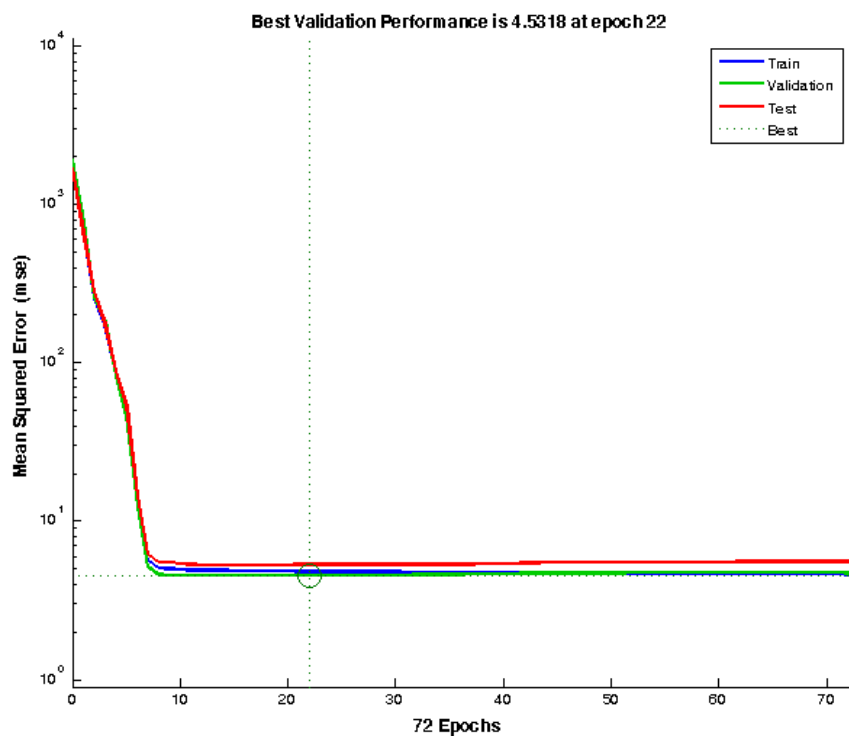


Figura 1 – Performance do Treino da Rede Neuronal

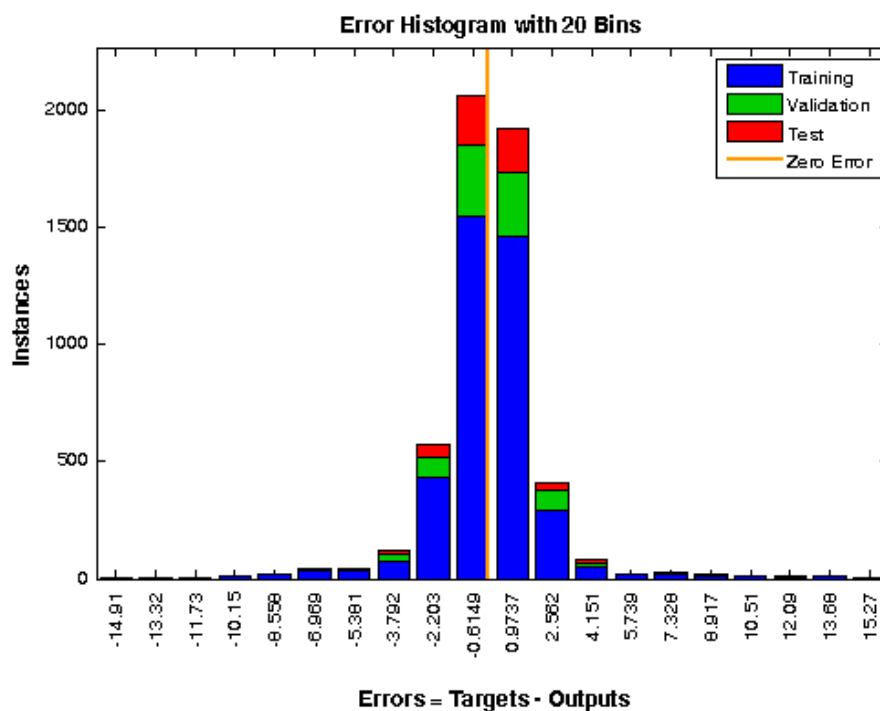


Figura 2 - Histograma dos Erros no treino da Rede Neuronal

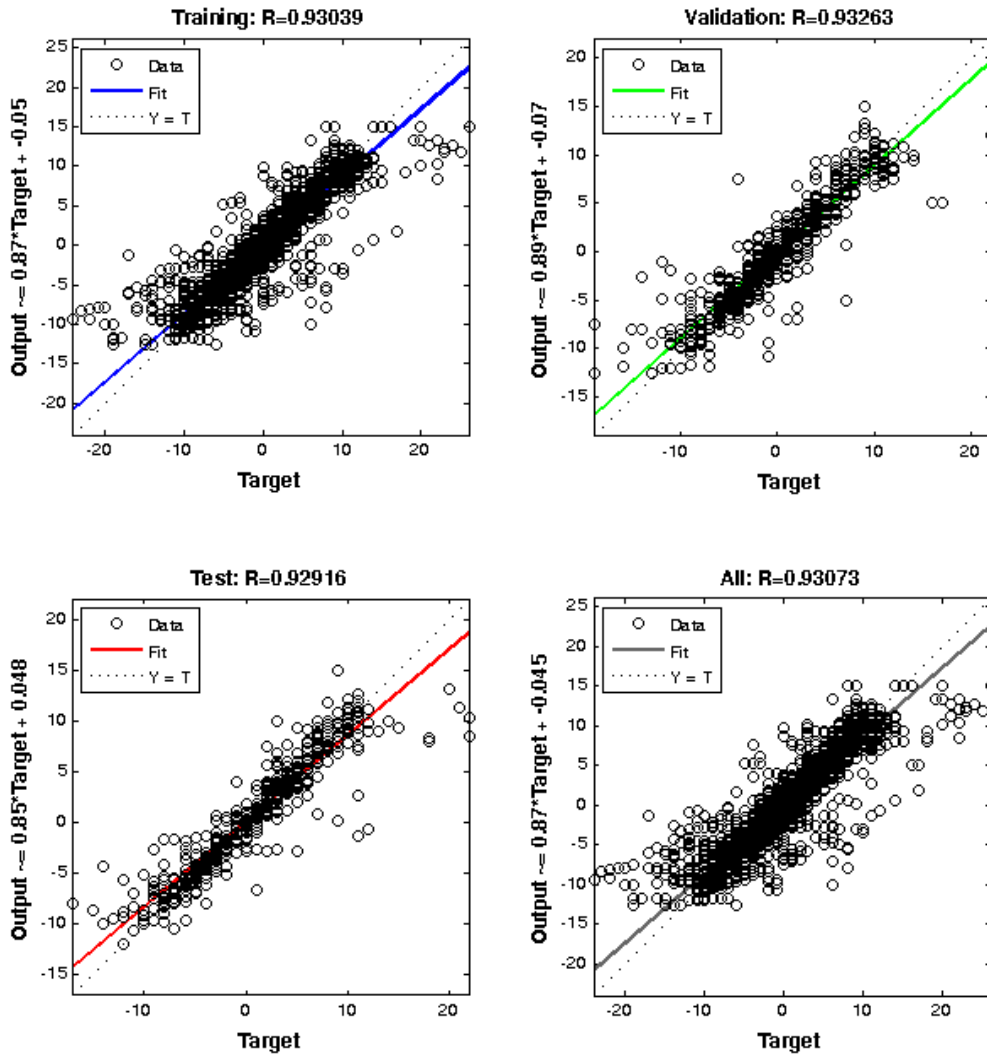


Figura 3 - Regressão Linear da Rede Neuronal

Excerto de ficheiro de Dados de EA (pré tratamento)

param list file.

$-U_j =$	$\hat{O} @ \mu_j =$	$\Sigma \hat{\sigma} \rightarrow (dB)$	$f_{-} (mv)$	$\hat{O}_j \hat{A} \Delta$	$\dots \hat{\sigma} \dots \hat{\sigma} \Delta$	$\geq \pm \dots \pm \% (us)$	$\dots \hat{\sigma} \dots \hat{\sigma} \% (us)$	RMS(dB)	ASL(dB)	$\mu \hat{O} \hat{O} \pm \% (ms)$	$f_{-} \hat{O} (mv \cdot ms)$	$\pm \%$
236, 3,	100,0,	112,3,	4713,	2089,	63982,	36285,	75,4,	67,0,	105437,	1883452392,0,	16:15:42:640 000017	
237, 1,	100,0,	92,9,	2743,	13,	63960,	81,	75,6,	65,4,	105437,	1555964082,9,	16:15:42:640 000040	
238, 4,	100,0,	83,3,	2481,	0,	63828,	0,	76,7,	64,4,	105437,	1389339301,8,	16:15:42:640 000169	
239, 2,	100,0,	63,4,	1748,	0,	63505,	0,	76,4,	62,0,	105437,	1046697510,9,	16:15:42:640 000203	
240, 4,	100,0,	31,4,	663,	26,	61686,	2409,	75,0,	55,9,	105439,	488738764,4,	16:15:42:640 002033	
241, 4,	100,0,	37,2,	663,	259,	61704,	2592,	73,7,	57,4,	105439,	579858535,3,	16:15:42:640 002134	
242, 2,	100,0,	55,6,	776,	9,	61703,	56,	77,6,	60,9,	105439,	8664771026,1,	16:15:42:640 002140	
243, 2,	100,0,	25,3,	342,	22,	60002,	98,	73,7,	54,1,	105440,	373177484,0,	16:15:42:640 003859	
244, 2,	100,0,	19,0,	235,	14,	59833,	75,	73,2,	51,6,	105441,	278900759,0,	16:15:42:640 004167	
245, 2,	100,0,	30,7,	238,	0,	54548,	4,	76,1,	55,8,	105441,	374619410,8,	16:15:42:640 004442	
246, 2,	100,0,	13,2,	128,	18,	54290,	124,	72,5,	48,4,	105441,	159843096,7,	16:15:42:640 004725	
247, 2,	100,0,	17,1,	71,	0,	49126,	0,	73,2,	50,7,	105441,	168846797,4,	16:15:42:640 004849	
248, 2,	100,0,	17,1,	123,	22,	49082,	139,	73,9,	50,7,	105442,	168853572,4,	16:15:42:640 005096	
249, 2,	100,0,	23,6,	173,	2,	49014,	16,	74,8,	53,5,	105442,	232601186,5,	16:15:42:640 005245	
250, 2,	100,0,	21,2,	128,	6,	48875,	35,	74,6,	52,5,	105442,	207614901,5,	16:15:42:640 005402	
251, 2,	100,0,	21,0,	79,	0,	37519,	8,	74,4,	52,4,	105442,	121085550,8,	16:15:42:640 005805	
252, 2,	100,0,	15,4,	85,	11,	37372,	104,	73,1,	49,7,	105442,	87908735,8,	16:15:42:640 005805	
253, 2,	100,0,	18,6,	123,	6,	37487,	48,	72,4,	51,4,	105443,	107102287,2,	16:15:42:640 006107	
254, 2,	100,0,	573,7,	123,	9,	1438,	73,	89,7,	81,2,	105443,	4860516,3,	16:15:42:640 006375	
255, 2,	100,0,	917,1,	167,	88,	1830,	1140,	91,6,	85,2,	105443,	12577803,5,	16:15:42:640 006673	
256, 2,	100,0,	744,7,	234,	93,	2505,	1525,	90,1,	83,4,	105443,	19137579,9,	16:15:42:640 006977	
257, 2,	100,0,	418,8,	140,	27,	2863,	135,	87,7,	78,4,	105444,	14057753,3,	16:15:42:640 007247	
258, 2,	100,0,	455,1,	216,	37,	3789,	2655,	87,7,	79,2,	105444,	26764944,0,	16:15:42:640 007456	
259, 2,	100,0,	221,8,	210,	150,	4162,	3686,	83,7,	72,9,	105444,	15732279,0,	16:15:42:640 007559	
260, 2,	100,0,	228,0,	278,	1,	4075,	3,	82,6,	73,2,	105444,	15502479,6,	16:15:42:640 007813	
261, 2,	100,0,	516,2,	461,	9,	4802,	64,	87,4,	80,3,	105445,	48758051,1,	16:15:42:640 008503	
262, 2,	100,0,	184,9,	305,	291,	3993,	3854,	80,9,	71,3,	105446,	12077576,2,	16:15:42:640 009482	
263, 2,	100,0,	250,6,	301,	289,	3628,	3507,	82,7,	74,0,	105447,	13512148,4,	16:15:42:640 010110	
264, 2,	100,0,	165,0,	131,	117,	2676,	2494,	81,5,	70,3,	105448,	4839238,9,	16:15:42:640 011245	
265, 2,	100,0,	343,2,	451,	285,	3085,	2224,	83,2,	76,7,	105448,	13380548,0,	16:15:42:640 011721	
266, 2,	99,9,	297,8,	305,	268,	3122,	2967,	82,8,	75,5,	105448,	11890003,9,	16:15:42:640 011888	
267, 2,	99,1,	186,0,	380,	69,	3150,	1705,	79,6,	71,4,	105450,	7558496,7,	16:15:42:640 013305	
268, 2,	94,0,	66,0,	136,	0,	3488,	0,	73,8,	62,4,	105450,	3287278,7,	16:15:42:640 013475	

269	2	97.8	82.0	171	5	3309	69	76.1	64.3	105450	3678500.3	16:15:42:640 013738
270	3	92.4	22.9	106	82	3421	3260	68.0	53.2	105450	1097591.9	16:15:42:640 013921
271	2	86.5	29.8	215	0	2649	0	65.5	55.5	105451	857295.0	16:15:42:640 014806
272	2	86.3	7.1	18	4	2550	2465	61.7	43.0	105452	188924.7	16:15:42:640 015010
273	1	88.4	23.9	35	7	1277	1140	67.0	53.6	105453	159867.6	16:15:42:640 016457
274	1	84.9	12.0	31	2	934	781	62.3	47.6	105453	42921.0	16:15:42:640 016964
275	1	76.6	1.0	2	1	857	855	50.0	26.2	105454	3092.2	16:15:42:640 017048
276	1	83.3	40.3	13	4	732	665	68.5	58.1	105454	88491.4	16:15:42:640 017364
277	1	77.3	3.5	10	1	705	648	55.3	36.9	105454	7113.5	16:15:42:640 017455
278	1	82.4	26.5	19	8	740	680	66.3	54.5	105454	59354.9	16:15:42:640 017560
279	2	85.8	23.5	35	5	774	582	65.6	53.4	105454	57701.0	16:15:42:640 017737
280	1	77.2	4.7	15	5	726	665	55.6	39.5	105454	10201.7	16:15:42:640 017898
281	3	87.7	21.9	31	6	851	754	66.2	52.8	105454	64973.4	16:15:42:640 017959
282	1	78.4	5.1	14	1	827	715	57.0	40.2	105455	14371.7	16:15:42:640 018098
283	3	81.0	15.2	8	1	793	753	62.9	49.7	105455	39238.0	16:15:42:640 018185
284	1	75.2	3.9	14	8	814	769	54.6	37.8	105455	10521.2	16:15:42:640 018300
285	1	83.2	23.1	36	4	866	685	64.3	53.3	105455	70985.4	16:15:42:640 018513
286	1	75.8	2.5	5	3	773	769	53.4	34.1	105455	6233.1	16:15:42:640 018627
287	1	82.4	13.9	27	9	780	629	62.8	48.8	105455	34508.4	16:15:42:640 018810
288	3	75.0	0.9	5	2	754	734	48.3	25.4	105455	2162.0	16:15:42:640 018925
289	2	82.0	14.2	21	9	786	744	62.6	49.0	105455	35961.0	16:15:42:640 018979
290	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105456	0.0	16:15:42:640 019157
291	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105456	0.0	16:15:42:640 019382
292	3	71.6	190.4	0	0	0	0	71.6	71.6	105456	0.0	16:15:42:640 019402
293	3	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105456	0.0	16:15:42:640 019629
294	2	70.8	173.3	0	0	0	0	70.8	70.8	105456	0.0	16:15:42:640 019680
295	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105456	0.0	16:15:42:640 019771
296	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105456	0.0	16:15:42:640 019844
297	2	70.4	166.0	0	0	0	0	70.4	70.4	105456	0.0	16:15:42:640 019853
298	3	71.6	190.4	0	0	0	0	71.6	71.6	105456	0.0	16:15:42:640 019895
299	1	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105456	0.0	16:15:42:640 019942
300	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020048
301	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020089
302	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020119
303	1	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105457	0.0	16:15:42:640 020196
304	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020344
305	2	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105457	0.0	16:15:42:640 020370
306	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105457	0.0	16:15:42:640 020403
307	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020471
308	3	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105457	0.0	16:15:42:640 020662
309	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105457	0.0	16:15:42:640 020690
310	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020691
311	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105457	0.0	16:15:42:640 020835
312	4	70.4	166.0	0	0	0	0	70.4	70.4	105457	0.0	16:15:42:640 020989
313	2	70.3	163.6	0	0	0	0	70.3	70.3	105458	0.0	16:15:42:640 021043
314	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105458	0.0	16:15:42:640 021071
315	1	69.7	153.8	0	0	0	0	69.7	69.7	105458	0.0	16:15:42:640 021083
316	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105458	0.0	16:15:42:640 021218
317	4	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105458	0.0	16:15:42:640 021372
318	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105458	0.0	16:15:42:640 021398
319	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105458	0.0	16:15:42:640 021428
320	1	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105458	0.0	16:15:42:640 021476
321	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105458	0.0	16:15:42:640 021491
322	1	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105458	0.0	16:15:42:640 021626
323	1	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105458	0.0	16:15:42:640 021741
324	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105458	0.0	16:15:42:640 021756
325	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105458	0.0	16:15:42:640 021771
326	3	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105458	0.0	16:15:42:640 022000
327	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105459	0.0	16:15:42:640 022035
328	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105459	0.0	16:15:42:640 022506
329	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105459	0.0	16:15:42:640 022629
330	1	70.5	168.5	0	0	0	0	70.5	70.5	105459	0.0	16:15:42:640 022810
331	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105460	0.0	16:15:42:640 023065
332	1	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105460	0.0	16:15:42:640 023089
333	4	69.6	151.4	0	0	0	0	69.6	69.6	105460	0.0	16:15:42:640 023185
334	1	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105460	0.0	16:15:42:640 023225
335	3	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105460	0.0	16:15:42:640 023308
336	4	69.9	156.3	0	0	0	0	69.9	69.9	105460	0.0	16:15:42:640 023328
337	1	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105460	0.0	16:15:42:640 023444
338	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105460	0.0	16:15:42:640 023526
339	3	69.9	156.3	0	0	0	0	69.9	69.9	105460	0.0	16:15:42:640 023536
340	4	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105460	0.0	16:15:42:640 023670
341	1	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105460	0.0	16:15:42:640 023815
342	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105460	0.0	16:15:42:640 023882
343	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105460	0.0	16:15:42:640 023948
344	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105461	0.0	16:15:42:640 024006
345	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105461	0.0	16:15:42:640 024011
346	1	69.0	141.6	0	0	0	0	69.0	69.0	105461	0.0	16:15:42:640 024095
347	2	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105461	0.0	16:15:42:640 024116
348	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105461	0.0	16:15:42:640 024275
349	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105461	0.0	16:15:42:640 024341
350	1	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105461	0.0	16:15:42:640 024408
351	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105461	0.0	16:15:42:640 024419
352	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105461	0.0	16:15:42:640 024462
353	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105461	0.0	16:15:42:640 024468
354	3	70.1	161.1	0	0	0	0	70.1	70.1	105461	0.0	16:15:42:640 024582
355	1	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105461	0.0	16:15:42:640 024606
356	2	71.9	197.8	0	0	0	0	71.9	71.9	105461	0.0	16:15:42:640 024614
357	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105461	0.0	16:15:42:640 024744
358	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105461	0.0	16:15:42:640 024828
359	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105461	0.0	16:15:42:640 024859
360	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105461	0.0	16:15:42:640 024991
361	2	69.0	141.6	0	0	0	0	69.0	69.0	105462	0.0	16:15:42:640 025076
362	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105462	0.0	16:15:42:640 025081
363	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105462	0.0	16:15:42:640 025083
364	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105462	0.0	16:15:42:640 025340
365	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105462	0.0	16:15:42:640 025353
366	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105462	0.0	16:15:42:640 025405
367	2	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105462	0.0	16:15:42:640 025462

397	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105465	0.0	16:15:42:640 028109
398	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105465	0.0	16:15:42:640 028257
399	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105465	0.0	16:15:42:640 028279
400	4	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105465	0.0	16:15:42:640 028651
401	3	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105465	0.0	16:15:42:640 028847
402	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105465	0.0	16:15:42:640 028899
403	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105465	0.0	16:15:42:640 028920
404	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105466	0.0	16:15:42:640 029011
405	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105466	0.0	16:15:42:640 029177
406	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105466	0.0	16:15:42:640 029183
407	2	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105466	0.0	16:15:42:640 029238
408	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105466	0.0	16:15:42:640 029438
409	3	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105466	0.0	16:15:42:640 029473
410	2	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105466	0.0	16:15:42:640 029509
411	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105466	0.0	16:15:42:640 029575
412	4	70.1	161.1	0	0	0	0	70.1	70.1	105467	0.0	16:15:42:640 030004
413	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105467	0.0	16:15:42:640 030065
414	3	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105467	0.0	16:15:42:640 030081
415	4	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105467	0.0	16:15:42:640 030122
416	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105467	0.0	16:15:42:640 030464
417	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105467	0.0	16:15:42:640 030539
418	1	69.5	146.9	0	0	0	0	69.5	69.5	105467	0.0	16:15:42:640 030572
419	2	69.3	146.5	0	0	0	0	69.3	69.3	105467	0.0	16:15:42:640 030587
420	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105467	0.0	16:15:42:640 030676
421	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105467	0.0	16:15:42:640 030761
422	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105467	0.0	16:15:42:640 030781
423	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105467	0.0	16:15:42:640 030906
424	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105468	0.0	16:15:42:640 031113
425	4	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105468	0.0	16:15:42:640 031114
426	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105468	0.0	16:15:42:640 031249
427	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105468	0.0	16:15:42:640 031318
428	4	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105468	0.0	16:15:42:640 031413
429	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105468	0.0	16:15:42:640 031459
430	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105468	0.0	16:15:42:640 031535
431	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105468	0.0	16:15:42:640 031541
432	1	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105468	0.0	16:15:42:640 031617
433	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105468	0.0	16:15:42:640 031745
434	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105468	0.0	16:15:42:640 031768
435	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105468	0.0	16:15:42:640 031828
436	4	70.9	175.8	0	0	0	0	70.9	70.9	105468	0.0	16:15:42:640 031983
437	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105469	0.0	16:15:42:640 032007
438	1	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105469	0.0	16:15:42:640 032011
439	2	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105469	0.0	16:15:42:640 032257
440	1	69.0	141.6	0	0	0	0	69.0	69.0	105469	0.0	16:15:42:640 032301
441	3	71.0	179.2	0	0	0	0	71.0	71.0	105469	0.0	16:15:42:640 032322
442	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105469	0.0	16:15:42:640 032552
443	1	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105469	0.0	16:15:42:640 032740
444	4	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105469	0.0	16:15:42:640 032742
445	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105469	0.0	16:15:42:640 032757
446	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105469	0.0	16:15:42:640 032813
447	3	71.6	190.4	0	0	0	0	71.6	71.6	105470	0.0	16:15:42:640 033048
448	1	70.0	158.7	0	0	0	0	70.0	70.0	105470	0.0	16:15:42:640 033079
449	2	69.6	151.4	0	0	0	0	69.6	69.6	105470	0.0	16:15:42:640 033102
450	1	70.0	158.7	0	0	0	0	70.0	70.0	105470	0.0	16:15:42:640 033322
451	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105470	0.0	16:15:42:640 033329
452	3	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105470	0.0	16:15:42:640 033368
453	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105470	0.0	16:15:42:640 033416
454	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105470	0.0	16:15:42:640 033497
455	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105470	0.0	16:15:42:640 033575
456	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105470	0.0	16:15:42:640 033601
457	1	70.8	173.3	0	0	0	0	70.8	70.8	105470	0.0	16:15:42:640 033717
458	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105470	0.0	16:15:42:640 033938
459	1	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105471	0.0	16:15:42:640 034023
460	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105471	0.0	16:15:42:640 034044
461	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105471	0.0	16:15:42:640 034202
462	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105471	0.0	16:15:42:640 034207
463	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105471	0.0	16:15:42:640 034407
464	4	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105471	0.0	16:15:42:640 034411
465	3	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105471	0.0	16:15:42:640 034475
466	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105471	0.0	16:15:42:640 034756
467	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105472	0.0	16:15:42:640 034885
468	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105472	0.0	16:15:42:640 035003
469	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105472	0.0	16:15:42:640 035614
470	4	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105473	0.0	16:15:42:640 036058
471	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105473	0.0	16:15:42:640 036113
472	2	72.2	205.1	0	0	0	0	72.2	72.2	105473	0.1	16:15:42:640 036158
473	1	69.7	153.8	0	0	0	0	69.7	69.7	105473	0.0	16:15:42:640 036197
474	4	73.1	227.1	0	0	0	0	73.1	73.1	105473	0.1	16:15:42:640 036291
475	2	73.5	236.8	0	0	0	0	73.5	73.5	105473	0.1	16:15:42:640 036358
476	1	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105473	0.0	16:15:42:640 036389
477	3	80.6	539.6	0	0	0	0	80.6	80.6	105473	0.1	16:15:42:640 036494
478	2	72.8	219.7	0	0	0	0	72.8	72.8	105473	0.1	16:15:42:640 036525
479	3	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105473	0.0	16:15:42:640 036794
480	3	73.3	231.9	0	0	0	0	73.3	73.3	105474	0.1	16:15:42:640 037179
481	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105474	0.0	16:15:42:640 037213
482	1	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105474	0.0	16:15:42:640 037377
483	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105474	0.0	16:15:42:640 037476
484	1	69.7	153.8	0	0	0	0	69.7	69.7	105474	0.0	16:15:42:640 037771
485	3	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105474	0.0	16:15:42:640 037835
486	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105474	0.0	16:15:42:640 037888
487	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105475	0.0	16:15:42:640 038039
488	4	79.3	463.9	0	0	0	0	79.3	79.3	105475	0.1	16:15:42:640 038050
489	1	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105475	0.0	16:15:42:640 038158
490	4	70.7	170.9	0	0	0	0	70.7	70.7	105475	0.0	16:15:42:640 038223
491	1	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105475	0.0	16:15:42:640 038273
492	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105475	0.0	16:15:42:640 038328
493	3	70.4	166.0	0	0	0	0	70.4	70.4	105475	0.0	16:15:42:640 038378
494	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105475	0.0	16:15:42:640 038644
495	1	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105475	0.0	16:15:42:640 038769
496	2	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105475	0.0	16:15:42:640 038772
497	3	69.3	146.5	0	0							

767	2	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105661	0.0	16:15:42:843 021334
768	4	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105661	0.0	16:15:42:843 021622
769	2	84.9	878.9	0	0	0	84.9	84.9	105667	0.2	16:15:42:843 027623
770	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105667	0.0	16:15:42:843 027998
771	4	69.2	144.0	0	0	0	69.2	69.2	105670	0.0	16:15:42:843 030089
772	4	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105672	0.0	16:15:42:843 032602
773	3	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105672	0.0	16:15:42:843 032605
774	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105672	0.0	16:15:42:843 032655
775	4	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105673	0.0	16:15:42:843 033146
776	2	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105673	0.0	16:15:42:843 033884
777	2	69.0	141.6	0	0	0	69.0	69.0	105674	0.0	16:15:42:843 034360
778	2	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105674	0.0	16:15:42:843 034576
779	4	68.6	134.3	0	0	0	68.6	68.6	105674	0.0	16:15:42:843 034608
780	3	69.0	141.6	0	0	0	69.0	69.0	105674	0.0	16:15:42:843 034615
781	2	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105676	0.0	16:15:42:843 036378
782	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105678	0.0	16:15:42:843 038250
783	2	69.7	153.8	0	0	0	69.7	69.7	105679	0.0	16:15:42:843 039983
784	2	72.8	219.7	0	0	0	72.8	72.8	105680	0.1	16:15:42:843 040670
785	4	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105680	0.0	16:15:42:843 040696
786	4	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105681	0.0	16:15:42:843 041107
787	3	69.2	144.0	0	0	0	69.2	69.2	105681	0.0	16:15:42:843 041115
788	2	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105681	0.0	16:15:42:843 041144
789	1	69.9	156.3	0	0	0	69.9	69.9	105681	0.0	16:15:42:843 041152
790	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105681	0.0	16:15:42:843 041344
791	3	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105681	0.0	16:15:42:843 041347
792	1	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105681	0.0	16:15:42:843 041439
793	4	69.3	146.5	0	0	0	69.3	69.3	105681	0.0	16:15:42:843 041440
794	3	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105681	0.0	16:15:42:843 041596
795	4	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105681	0.0	16:15:42:843 041606
796	2	69.3	146.5	0	0	0	69.3	69.3	105681	0.0	16:15:42:843 041694
797	4	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105682	0.0	16:15:42:843 042021
798	4	68.6	134.3	0	0	0	68.6	68.6	105682	0.0	16:15:42:843 042171
799	2	76.0	317.4	0	0	0	76.0	76.0	105682	0.1	16:15:42:843 042942
800	4	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105682	0.0	16:15:42:843 042968
801	4	70.1	161.1	0	0	0	70.1	70.1	105683	0.0	16:15:42:843 043504
802	3	69.3	146.5	0	0	0	69.3	69.3	105683	0.0	16:15:42:843 043511
803	2	69.6	151.4	0	0	0	69.6	69.6	105683	0.0	16:15:42:843 043651
804	1	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105683	0.0	16:15:42:843 043654
805	1	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105683	0.0	16:15:42:843 043765
806	2	71.1	180.7	0	0	0	71.1	71.1	105683	0.0	16:15:42:843 043854
807	4	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105683	0.0	16:15:42:843 043923
808	3	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105683	0.0	16:15:42:843 043966
809	2	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105683	0.0	16:15:42:843 043995
810	2	69.3	146.5	0	0	0	69.3	69.3	105684	0.0	16:15:42:843 044176
811	4	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105684	0.0	16:15:42:843 044292
812	3	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105684	0.0	16:15:42:843 044348
813	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105684	0.0	16:15:42:843 044384
814	1	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105684	0.0	16:15:42:843 044398
815	1	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105684	0.0	16:15:42:843 044634
816	4	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105684	0.0	16:15:42:843 044677
817	2	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105684	0.0	16:15:42:843 044713
818	4	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105684	0.0	16:15:42:843 044826
819	3	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105684	0.0	16:15:42:843 044836
820	4	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105685	0.0	16:15:42:843 045088
821	2	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105685	0.0	16:15:42:843 045244
822	4	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105685	0.0	16:15:42:843 045244
823	4	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105685	0.0	16:15:42:843 045407
824	2	72.1	202.6	0	0	0	72.1	72.1	105686	0.0	16:15:42:843 046102
825	4	68.6	134.3	0	0	0	68.6	68.6	105686	0.0	16:15:42:843 046129
826	1	70.8	173.3	0	0	0	70.8	70.8	105686	0.0	16:15:42:843 046159
827	2	73.9	249.0	0	0	0	73.9	73.9	105688	0.1	16:15:42:843 048795
828	4	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105688	0.0	16:15:42:843 048826
829	3	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105688	0.0	16:15:42:843 048907
830	4	69.5	148.9	0	0	0	69.5	69.5	105689	0.0	16:15:42:843 049722
831	3	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105689	0.0	16:15:42:843 049734
832	2	69.7	153.8	0	0	0	69.7	69.7	105689	0.0	16:15:42:843 049774
833	1	68.4	131.8	0	0	0	68.4	68.4	105689	0.0	16:15:42:843 049791
834	4	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105690	0.0	16:15:42:843 050062
835	4	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105690	0.0	16:15:42:843 050176
836	2	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105691	0.0	16:15:42:843 051021
837	2	69.0	141.6	0	0	0	69.0	69.0	105691	0.0	16:15:42:843 051141
838	4	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105691	0.0	16:15:42:843 051239
839	2	83.8	778.8	0	0	0	83.8	83.8	105691	0.2	16:15:42:843 051634
840	3	69.3	146.5	0	0	0	69.3	69.3	105691	0.0	16:15:42:843 051653
841	4	74.7	273.4	0	0	0	74.7	74.7	105691	0.1	16:15:42:843 051660
842	1	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105691	0.0	16:15:42:843 051685
843	2	70.9	175.8	0	0	0	70.9	70.9	105691	0.0	16:15:42:843 051863
844	4	68.9	139.2	0	0	0	68.9	68.9	105691	0.0	16:15:42:843 051889
845	2	68.6	134.3	0	0	0	68.6	68.6	105692	0.0	16:15:42:843 052441
846	2	72.0	200.2	0	0	0	72.0	72.0	105695	0.0	16:15:42:843 055286
847	3	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105695	0.0	16:15:42:843 055305
848	4	73.9	249.0	0	0	0	73.9	73.9	105695	0.1	16:15:42:843 055312
849	1	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105695	0.0	16:15:42:843 055337
850	2	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105695	0.0	16:15:42:843 055578
851	3	70.0	158.7	0	0	0	70.0	70.0	105696	0.0	16:15:42:843 056280
852	4	74.3	261.2	0	0	0	74.3	74.3	105696	0.1	16:15:42:843 056283
853	2	69.6	151.4	0	0	0	69.6	69.6	105696	0.0	16:15:42:843 056314
854	1	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105696	0.0	16:15:42:843 056335
855	1	68.2	129.4	0	0	0	68.2	68.2	105696	0.0	16:15:42:843 056444
856	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105696	0.0	16:15:42:843 056503
857	3	69.3	146.5	0	0	0	69.3	69.3	105696	0.0	16:15:42:843 056586
858	4	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105696	0.0	16:15:42:843 056607
859	4	69.2	144.0	0	0	0	69.2	69.2	105696	0.0	16:15:42:843 056729
860	3	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105696	0.0	16:15:42:843 056769
861	4	68.1	127.0	0	0	0	68.1	68.1	105697	0.0	16:15:42:843 057192
862	2	70.9	175.8	0	0	0	70.9	70.9	105697	0.0	16:15:42:843 057693
863	4	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105697	0.0	16:15:42:843 057724
864	4	71.3	183.1	0	0	0	71.3	71.3	105698	0.0	16:15:42:843 058651
865	3	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105698	0.0	16:15:42:843 058654
866	1	68.6	134.3	0	0	0	68.6	68.6	105698	0.0	16:15:42:843 058690
867	2	69.2	144.0	0	0	0	69.2	69.2	105698	0.0	16:15:42:843 058695
868	2	72.6	214.8	0	0	0	72.6	72.6	105699	0.1	16:15:42:843 059500
869	2	68.7	136.7	0	0	0	68.7	68.7	105700	0.0	16:15:42:843 060031
870	2	69.9	156.3	0	0	0	69.9	69.9	105701	0.0	16:15:42:843 061534
871	2	67.9	124.5	0	0	0	67.9	67.9	105702	0.0	16:15:42:843 062575
872	2	69.2	144.0	0	0	0	69.2				

895	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105711	0.0	16:15:42:906 008177
896	4	70.5	168.5	0	0	0	0	70.5	70.5	105714	0.0	16:15:42:906 011856
897	3	69.9	156.3	0	0	0	0	69.9	69.9	105714	0.0	16:15:42:906 011863
898	1	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105714	0.0	16:15:42:906 011901
899	2	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105714	0.0	16:15:42:906 011904
900	4	69.0	141.6	0	0	0	0	69.0	69.0	105715	0.0	16:15:42:906 012034
901	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105715	0.0	16:15:42:906 012508
902	4	69.3	146.5	0	0	0	0	69.3	69.3	105715	0.0	16:15:42:906 012901
903	3	69.0	141.6	0	0	0	0	69.0	69.0	105715	0.0	16:15:42:906 012908
904	4	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105718	0.0	16:15:42:906 015239
905	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105719	0.0	16:15:42:906 016409
906	4	69.3	146.5	0	0	0	0	69.3	69.3	105719	0.0	16:15:42:906 016441
907	4	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105720	0.0	16:15:42:906 017391
908	3	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105720	0.0	16:15:42:906 017403
909	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105720	0.0	16:15:42:906 017432
910	1	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105720	0.0	16:15:42:906 017458
911	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105720	0.0	16:15:42:906 017716
912	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105720	0.0	16:15:42:906 017926
913	4	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105721	0.0	16:15:42:906 018556
914	2	69.6	151.4	0	0	0	0	69.6	69.6	105724	0.0	16:15:42:906 021982
915	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105725	0.0	16:15:42:906 022008
916	4	70.5	168.5	0	0	0	0	70.5	70.5	105734	0.0	16:15:42:906 031697
917	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105734	0.0	16:15:42:906 031705
918	4	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105735	0.0	16:15:42:906 032233
919	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105737	0.0	16:15:42:906 034610
920	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105738	0.0	16:15:42:906 035726
921	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105743	0.0	16:15:42:906 040204
922	4	73.7	241.7	0	0	0	0	73.7	73.7	105743	0.1	16:15:42:906 040956
923	3	70.4	166.0	0	0	0	0	70.4	70.4	105743	0.0	16:15:42:906 040963
924	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105743	0.0	16:15:42:906 040992
925	1	69.2	144.0	0	0	0	0	69.2	69.2	105744	0.0	16:15:42:906 041000
926	2	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105744	0.0	16:15:42:906 041748
927	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105745	0.0	16:15:42:906 042060
928	4	71.1	180.7	0	0	0	0	71.1	71.1	105747	0.0	16:15:42:906 044394
929	3	69.3	146.5	0	0	0	0	69.3	69.3	105747	0.0	16:15:42:906 044407
930	2	68.7	136.7	0	0	0	0	68.7	68.7	105747	0.0	16:15:42:906 044493
931	4	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105754	0.0	16:15:42:906 051003
932	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105754	0.0	16:15:42:906 051697
933	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105754	0.0	16:15:42:906 051712
934	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105754	0.0	16:15:42:906 051793
935	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105755	0.0	16:15:42:906 052072
936	2	71.1	180.7	0	0	0	0	71.1	71.1	105755	0.0	16:15:42:906 052158
937	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105755	0.0	16:15:42:906 052642
938	4	99.4	1.7	116	10	49875	9248	30.4	30.4	105772	13047850.6	16:15:42:968 007859
939	3	95.1	0.7	72	7	49883	9236	52.0	23.2	105772	5740195.6	16:15:42:968 007872
940	2	91.1	1.2	40	1	21929	30	53.2	27.8	105782	2435528.1	16:15:42:968 017089
941	3	86.8	0.7	11	1	21817	43	51.5	22.8	105782	1342158.8	16:15:42:968 017107
942	4	78.3	0.1	10	0	21889	21814	39.2	5.4	105782	183621.0	16:15:42:968 017114
943	1	69.9	156.3	0	0	0	0	69.9	69.9	105782	0.0	16:15:42:968 017139
944	2	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105782	0.0	16:15:42:968 017396
945	4	71.1	180.7	0	0	0	0	71.1	71.1	105783	0.0	16:15:42:968 018629
946	3	69.9	156.3	0	0	0	0	69.9	69.9	105783	0.0	16:15:42:968 018642
947	4	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105785	0.0	16:15:42:968 020501
948	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	105785	0.0	16:15:42:968 020504
949	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105785	0.0	16:15:42:968 020539
950	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105803	0.0	16:15:42:968 038769
951	3	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105803	0.0	16:15:42:968 038782
952	2	71.1	180.7	0	0	0	0	71.1	71.1	105803	0.0	16:15:42:968 038877
953	3	69.9	156.3	0	0	0	0	69.9	69.9	105803	0.0	16:15:42:968 038910
954	1	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105803	0.0	16:15:42:968 038927
955	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105804	0.0	16:15:42:968 039199
956	2	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105816	0.0	16:15:42:968 051620
957	4	70.0	158.7	0	0	0	0	70.0	70.0	105816	0.0	16:15:42:968 051665
958	2	90.1	90.3	15	6	109	43	74.3	65.1	105833	4567.7	16:15:43:031 005468
959	4	76.7	78.4	4	0	25	4	69.0	63.9	105833	207.1	16:15:43:031 005519
960	1	73.9	120.1	2	1	9	7	69.9	67.6	105833	42.4	16:15:43:031 005547
961	2	85.7	1.2	67	19	27641	11407	49.7	27.4	105930	3629380.0	16:15:43:109 024368
962	4	85.3	2.6	33	12	6719	6412	55.9	34.5	105935	498999.1	16:15:43:109 028577
963	3	81.9	2.2	17	2	6562	6421	54.2	32.7	105935	380069.3	16:15:43:109 028591
964	4	84.1	3.7	19	2	6417	6271	57.9	37.5	105935	632315.0	16:15:43:109 029762
965	4	79.5	21.1	9	4	254	236	63.2	52.5	105941	5569.5	16:15:43:109 035968
966	3	69.5	148.9	0	0	0	0	69.5	69.5	105941	0.0	16:15:43:109 035977
967	2	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	105942	0.0	16:15:43:109 036004
968	1	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	105942	0.0	16:15:43:109 036014
969	1	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105942	0.0	16:15:43:109 036180
970	2	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105942	0.0	16:15:43:109 036264
971	3	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105942	0.0	16:15:43:109 036271
972	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	105942	0.0	16:15:43:109 036353
973	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	105942	0.0	16:15:43:109 036521
974	4	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	105957	0.0	16:15:43:109 051982
975	4	80.4	1.7	104	8	26225	25428	51.1	30.7	105990	4835252.4	16:15:43:171 022456
976	4	84.0	0.8	25	5	22385	22058	49.8	24.0	105993	1625044.6	16:15:43:171 025839
977	3	79.8	0.5	24	17	22209	22130	47.1	19.5	105993	959562.3	16:15:43:171 025845
978	2	76.6	0.1	1	0	22204	22193	41.7	9.3	105993	296138.5	16:15:43:171 025865
979	4	71.3	2.0	7	0	195	193	50.7	32.0	106015	309.2	16:15:43:171 047876
980	3	72.5	6.3	3	0	251	238	56.1	42.0	106015	1638.6	16:15:43:171 047885
981	2	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	106015	0.0	16:15:43:171 047913
982	1	68.6	134.3	0	0	0	0	68.6	68.6	106016	0.0	16:15:43:171 048054
983	3	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	106016	0.0	16:15:43:171 048068
984	2	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	106016	0.0	16:15:43:171 048103
985	3	68.1	127.0	0	0	0	0	68.1	68.1	106016	0.0	16:15:43:171 048159
986	2	68.9	139.2	0	0	0	0	68.9	68.9	106016	0.0	16:15:43:171 048210
987	4	67.9	124.5	0	0	0	0	67.9	67.9	106016	0.0	16:15:43:171 048219
988	3	68.2	129.4	0	0	0	0	68.2	68.2	106016	0.0	16:15:43:171 048418
989	4	70.8	173.3	0	0	0	0	70.8	70.8	106016	0.0	16:15:43:171 048511
990	4	68.4	131.8	0	0	0	0	68.4	68.4	106016	0.0	16:15:43:171 048637
991	4	81.8	5.7	50	4	11018	4821	57.5	41.0	106043	2812278.5	16:15:43:234 012200
992	4	86.5	66.5	17	3	301	27	70.1	62.5	106048	24731.2	16:15:43:234 017014
993	3	83.2	113.3	10	6	200	83	72.5	66.9	106048	18179	

1023.	1.	100,0	258,8	20,	0,	535,	0,	82,6	74,3,	106651,	303907,7,	16:15:43:828 026367
1024.	3.	68,4	131,8	0,	0,	0,	0,	68,4	68,4	106651,	0,0	16:15:43:828 026367
1025.	4.	68,7	136,7	0,	0,	0,	0,	68,7	68,7	106651,	0,0	16:15:43:828 026367
1026.	2.	68,2	129,4	0,	0,	0,	0,	68,2	68,2	106651,	0,0	16:15:43:828 026582
1027.	1.	68,7	136,7	0,	0,	0,	0,	68,7	68,7	106651,	0,0	16:15:43:828 026593
1028.	3.	68,9	139,2	0,	0,	0,	0,	68,9	68,9	106651,	0,0	16:15:43:828 026760
1029.	4.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	106651,	0,0	16:15:43:828 026763
1030.	4.	68,7	136,7	0,	0,	0,	0,	68,7	68,7	106651,	0,0	16:15:43:828 026908
1031.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	106652,	0,0	16:15:43:828 027161
1032.	2.	68,7	136,7	0,	0,	0,	0,	68,7	68,7	106652,	0,0	16:15:43:828 027672
1033.	2.	74,2	0,0	8,	6,	47410,	47400,	27,9	-15,3	106691,	79286,2	16:15:43:890 004818
1034.	2.	69,0	141,6	0,	0,	0,	0,	69,0	69,0	106703,	0,0	16:15:43:890 016576
1035.	2.	69,3	146,5	0,	0,	0,	0,	69,3	69,3	106739,	0,0	16:15:43:890 052217
1036.	2.	100,0	20,1	36,	0,	4452,	0,	68,6	52,1	106868,	1632034,1	16:15:44:015 056893
1037.	3.	88,0	338,8	6,	0,	26,	1,	80,3	76,6	106868,	911,8	16:15:44:015 056911
1038.	4.	82,5	202,8	5,	2,	14,	7,	75,2	72,1	106868,	166,6	16:15:44:015 056928
1039.	2.	68,2	129,4	0,	0,	0,	0,	68,2	68,2	106869,	0,0	16:15:44:015 057151
1040.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	106869,	0,0	16:15:44:015 057661
1041.	2.	68,2	129,4	0,	0,	0,	0,	68,2	68,2	106873,	0,0	16:15:44:015 061344
1042.	2.	100,0	70,6	35,	4,	1528,	662,	73,7	63,0	106893,	674698,3	16:15:44:093 003502
1043.	2.	87,6	20,6	3,	0,	108,	0,	65,6	52,3	106894,	977,0	16:15:44:093 004161
1044.	4.	79,4	103,3	3,	1,	13,	5,	70,7	66,3	106894,	68,2	16:15:44:093 004202
1045.	3.	68,6	134,3	0,	0,	0,	0,	68,6	68,6	106894,	0,0	16:15:44:093 004205
1046.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	106894,	0,0	16:15:44:093 004418
1047.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	106894,	0,0	16:15:44:093 004925
1048.	2.	80,1	25,5	4,	0,	19,	0,	65,5	54,1	107013,	36,9	16:15:44:156 003538
1049.	2.	100,0	6,3	62,	28,	13967,	13040,	62,8	42,0	107082,	5050094,7	16:15:44:281 004966
1050.	2.	85,1	13,7	16,	16,	10445,	10314,	65,5	48,8	107086,	6137915,2	16:15:44:281 008044
1051.	2.	100,0	2,6	25,	0,	10146,	9625,	58,0	34,4	107086,	1102956,0	16:15:44:281 008383
1052.	2.	100,0	2996,5	4,	0,	27,	3,	97,5	95,5	107096,	9176,8	16:15:44:281 018005
1053.	4.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	107096,	0,0	16:15:44:281 018008
1054.	1.	68,6	134,3	0,	0,	0,	0,	68,6	68,6	107096,	0,0	16:15:44:281 018008
1055.	3.	68,9	139,2	0,	0,	0,	0,	68,9	68,9	107096,	0,0	16:15:44:281 018008
1056.	2.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	107096,	0,0	16:15:44:281 018255
1057.	4.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	107096,	0,0	16:15:44:281 018269
1058.	4.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	107096,	0,0	16:15:44:281 018489
1059.	2.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	107096,	0,0	16:15:44:281 018691
1060.	2.	83,8	105,6	10,	0,	31,	2,	72,0	66,5	107324,	402,9	16:15:44:484 043532
1061.	4.	76,7	0,1	9,	0,	25400,	4,	41,2	8,9	107370,	368975,4	16:15:44:546 027321
1062.	3.	74,1	0,1	13,	4,	25389,	25252,	37,8	5,4	107370,	245211,3	16:15:44:546 027329
1063.	2.	74,7	0,0	5,	2,	25424,	25385,	34,1	-2,5	107370,	99127,5	16:15:44:546 027347
1064.	4.	70,3	163,6	0,	0,	0,	0,	70,3	70,3	107395,	0,0	16:15:44:546 052562
1065.	3.	68,7	136,7	0,	0,	0,	0,	68,7	68,7	107395,	0,0	16:15:44:546 052570
1066.	3.	68,7	136,7	0,	0,	0,	0,	68,7	68,7	107395,	0,0	16:15:44:546 052721
1067.	1.	78,3	147,3	3,	0,	15,	0,	70,1	69,4	108109,	138,2	16:15:45:265 047314
1068.	2.	77,6	99,1	3,	0,	8,	0,	68,4	65,9	108109,	28,0	16:15:45:265 047314
1069.	3.	79,8	91,1	6,	0,	6,	0,	69,2	65,2	108109,	11,8	16:15:45:265 047314
1070.	4.	83,5	147,8	2,	0,	7,	0,	71,8	69,4	108109,	28,3	16:15:45:265 047314
1071.	4.	71,8	150,6	2,	1,	4,	2,	69,9	69,6	108478,	11,9	16:15:45:656 025714
1072.	2.	76,0	46,3	12,	0,	701,	0,	65,9	59,3	108616,	93233,9	16:15:45:796 023076
1073.	2.	68,2	129,4	0,	0,	0,	0,	68,2	68,2	108616,	0,0	16:15:45:796 023239
1074.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	108616,	0,0	16:15:45:796 023777
1075.	2.	79,1	0,1	17,	1,	20633,	1,	40,8	8,7	108733,	239177,0	16:15:45:921 015874
1076.	2.	71,5	188,0	0,	0,	0,	0,	71,5	71,5	108754,	0,0	16:15:45:921 036488
1077.	4.	80,1	0,1	16,	2,	32351,	29,	38,7	2,4	108946,	284811,7	16:15:46:124 025411
1078.	3.	73,9	31,7	10,	4,	122,	30,	63,3	56,0	108946,	1940,7	16:15:46:124 025442
1079.	2.	73,2	49,5	11,	6,	189,	105,	65,2	59,9	108946,	7281,6	16:15:46:124 025461
1080.	4.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	108946,	0,0	16:15:46:124 025953
1081.	2.	69,7	153,8	0,	0,	0,	0,	69,7	69,7	108967,	0,0	16:15:46:124 046607
1082.	2.	69,3	146,5	0,	0,	0,	0,	69,3	69,3	108978,	0,0	16:15:46:124 057751
1083.	2.	100,0	126,7	27,	1,	901,	1,	74,6	68,1	109012,	421602,6	16:15:46:187 028761
1084.	1.	100,0	48,5	10,	0,	98,	0,	74,7	59,7	109012,	1922,1	16:15:46:187 028763
1085.	3.	73,9	10,0	7,	3,	99,	72,	58,1	46,0	109012,	402,7	16:15:46:187 028763
1086.	4.	100,0	859,5	15,	0,	56,	0,	86,6	84,7	109012,	11100,4	16:15:46:187 028763
1087.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	109013,	0,0	16:15:46:187 029111
1088.	2.	68,1	127,0	0,	0,	0,	0,	68,1	68,1	109013,	0,0	16:15:46:187 029339
1089.	2.	100,0	5,4	47,	0,	24947,	0,	61,1	40,7	109175,	13841685,3	16:15:46:374 004598
1090.	1.	100,0	24,4	19,	0,	265,	0,	70,5	53,9	109175,	7036,2	16:15:46:374 004600
1091.	3.	80,4	21,4	16,	3,	195,	62,	63,5	52,6	109175,	3311,1	16:15:46:374 004600
1092.	4.	100,0	1094,0	19,	0,	56,	0,	91,4	86,8	109175,	14129,3	16:15:46:374 004600
1093.	2.	69,7	153,8	0,	0,	0,	0,	69,7	69,7	109175,	0,0	16:15:46:374 004839
1094.	2.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	109176,	0,0	16:15:46:374 005353
1095.	2.	80,1	507,8	0,	0,	0,	0,	80,1	80,1	109200,	0,1	16:15:46:374 029500
1096.	2.	78,7	91,8	9,	1,	10,	1,	69,8	65,3	109291,	34,1	16:15:46:453 041196
1097.	2.	74,4	60,8	9,	1,	18,	2,	66,1	61,7	109391,	81,2	16:15:46:578 016784
1098.	2.	79,3	1,3	17,	12,	2858,	2838,	51,2	27,9	109824,	41864,1	16:15:46:968 059138
1099.	2.	68,9	139,2	0,	0,	0,	0,	68,9	68,9	109826,	0,0	16:15:46:968 061969
1100.	2.	100,0	4,9	124,	0,	35152,	0,	61,4	39,7	110093,	24551632,6	16:15:47:296 000461
1101.	1.	100,0	110,6	102,	0,	4402,	0,	80,1	66,9	110093,	8779784,6	16:15:47:296 000461
1102.	4.	100,0	40,0	82,	0,	4511,	0,	73,4	58,0	110093,	3331228,7	16:15:47:296 000461
1103.	3.	100,0	36,7	27,	0,	4623,	0,	78,0	57,3	110093,	3213378,3	16:15:47:296 000462
1104.	2.	100,0	72,2	10,	0,	4296,	3990,	79,4	63,2	110093,	5457626,4	16:15:47:296 000712
1105.	3.	90,5	77,9	5,	0,	4870,	4262,	74,5	63,8	110093,	7566851,7	16:15:47:296 000749
1106.	4.	68,6	134,3	0,	0,	0,	0,	68,6	68,6	110093,	0,0	16:15:47:296 000814
1107.	4.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	110093,	0,0	16:15:47:296 000955
1108.	2.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	110094,	0,0	16:15:47:296 001163
1109.	2.	87,6	1208,5	0,	0,	0,	0,	87,6	87,6	110096,	0,3	16:15:47:296 003862
1110.	4.	69,7	153,8	0,	0,	0,	0,	69,7	69,7	110096,	0,0	16:15:47:296 003893
1111.	2.	74,1	253,9	0,	0,	0,	0,	74,1	74,1	110097,	0,1	16:15:47:296 004081
1112.	1.	68,4	131,8	0,	0,	0,	0,	68,4	68,4	110097,	0,0	16:15:47:296 004083
1113.	3.	69,2	144,0	0,	0,	0,	0,	69,2	69,2	110097,	0,0	16:15:47:296 004083
1114.	4.	69,6	151,4	0,	0,	0,	0,	69,6	69,6	110097,	0,0	16:15:47:296 004083
1115.	3.	68,2	129,4	0,	0,	0,	0,	68,2	68,2	110097,	0,0	16:15:47:296 004521
1116.	2.	69,0	141,6	0,	0,	0,	0,	69,0	69,0	110097,	0,0	16:15:47:296 004544
1117.	4.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	110097,	0,0	16:15:47:296 004544
1118.	4.	68,6	134,3	0,	0,	0,	0,	68,6	68,6	110097,	0,0	16:15:47:296 004688
1119.	3.	67,9	124,5	0,	0,	0,	0,	67,9	67,9	110097,	0,0	16:15:47:296 004701
1120.												

1151,	3,	86.5,	1059.6,	0,	0,	0,	0,	86.5,	86.5,	110333,	0.3,	16:15:47:499 037944
1152,	4,	89.8,	1555.2,	0,	0,	0,	0,	89.8,	89.8,	110333,	0.4,	16:15:47:499 037944
1153,	2,	68.2,	129.4,	0,	0,	0,	0,	68.2,	68.2,	110353,	0.0,	16:15:47:499 057211
1154,	2,	85.0,	1.6,	19,	2,	2552,	2519,	54.5,	30.0,	110371,	42261.3,	16:15:47:562 012410
1155,	2,	73.8,	246.6,	0,	0,	0,	0,	73.8,	73.8,	110373,	0.1,	16:15:47:562 014927
1156,	2,	83.2,	0.2,	24,	1,	22274,	29,	44.7,	13.5,	110500,	480879.7,	16:15:47:687 016252
1157,	2,	69.2,	144.0,	0,	0,	0,	0,	69.2,	69.2,	110500,	0.0,	16:15:47:687 016682
1158,	2,	72.4,	210.0,	0,	0,	0,	0,	72.4,	72.4,	110514,	0.1,	16:15:47:687 030947
1159,	2,	71.5,	188.0,	0,	0,	0,	0,	71.5,	71.5,	110522,	0.0,	16:15:47:687 038508
1160,	2,	89.6,	58.6,	37,	0,	427,	2,	69.7,	61.4,	110682,	43740.6,	16:15:47:828 057797
1161,	2,	68.1,	127.0,	0,	0,	0,	0,	68.1,	68.1,	110683,	0.0,	16:15:47:828 058125
1162,	2,	74.1,	0.1,	7,	0,	11947,	1,	37.8,	5.0,	110777,	52353.6,	16:15:47:953 027659
1163,	2,	69.6,	151.4,	0,	0,	0,	0,	69.6,	69.6,	110789,	0.0,	16:15:47:953 039594
1164,	2,	73.7,	58.1,	4,	0,	12,	1,	66.2,	61.3,	110980,	36.9,	16:15:48:156 027007
1165,	2,	100.0,	5.9,	64,	4,	25630,	24722,	61.6,	41.4,	111230,	15773190.7,	16:15:48:406 027104
1166,	2,	100.0,	50.8,	35,	0,	324,	4,	71.1,	60.1,	111254,	21917.1,	16:15:48:406 051823
1167,	1,	83.9,	42.5,	28,	9,	177,	50,	67.8,	58.6,	111254,	5448.8,	16:15:48:406 051827
1168,	3,	100.0,	1080.3,	17,	0,	58,	0,	92.5,	86.7,	111254,	14939.5,	16:15:48:406 051827
1169,	4,	68.7,	136.7,	0,	0,	0,	0,	68.7,	68.7,	111254,	0.0,	16:15:48:406 051827
1170,	2,	67.9,	124.5,	0,	0,	0,	0,	67.9,	67.9,	111255,	0.0,	16:15:48:406 052073
1171,	2,	68.1,	127.0,	0,	0,	0,	0,	68.1,	68.1,	111255,	0.0,	16:15:48:406 052595
1172,	2,	68.7,	87.1,	2,	0,	1,	0,	66.6,	64.8,	111405,	0.2,	16:15:48:546 062244
1173,	2,	71.4,	19.9,	3,	1,	13,	7,	60.6,	51.5,	112059,	13.9,	16:15:49:203 059052
1174,	2,	100.0,	228.5,	32,	1,	648,	2,	80.1,	73.2,	112233,	392933.1,	16:15:49:390 046955
1175,	1,	100.0,	301.9,	46,	0,	589,	0,	80.0,	75.6,	112233,	428494.9,	16:15:49:390 046957
1176,	3,	89.7,	123.1,	46,	15,	950,	89,	72.6,	67.8,	112233,	455337.5,	16:15:49:390 046957
1177,	4,	100.0,	239.3,	41,	0,	526,	0,	85.4,	73.6,	112233,	271066.4,	16:15:49:390 046957
1178,	2,	72.5,	17.9,	17,	0,	367,	0,	60.4,	51.0,	112234,	9850.6,	16:15:49:390 047077
1179,	2,	68.7,	136.7,	0,	0,	0,	0,	68.7,	68.7,	112234,	0.0,	16:15:49:390 047204
1180,	1,	67.9,	124.5,	0,	0,	0,	0,	67.9,	67.9,	112234,	0.0,	16:15:49:390 047312
1181,	4,	68.4,	131.8,	0,	0,	0,	0,	68.4,	68.4,	112234,	0.0,	16:15:49:390 047558
1182,	2,	77.8,	39.8,	6,	2,	20,	3,	65.9,	58.0,	112385,	63.7,	16:15:49:531 057419

Excerto de Código

%AESL_Main

```

global scord T;
prompt = {'Enter the source file folder path:', 'Enter the source file
name:;'};
dlg_title = 'Source File Location';
num_lines = 1;
defAns =
{'/Users/joaneves/Documents/MATLAB/Tese/Rede_Neuronal_
Artificial/Matrix_de_Treino/Trabalho', 'PV00'};
options.Resize='on';
options.WindowStyle='normal';
options.Interpreter='tex';
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,defAns,options);
s = strcat(answer{1,1},answer{2,1},'.txt');
name=strcat(answer{2,1},'.mat');
A=EAfileImport(s);
clearvars -except A T scord name;
preEAtimes=[A(:,2) A(:,11) A(:,16)*1000000+A(:,17)];
prompt = {'Enter the max delay between sensor caption:;'};
dlg_title = 'Maximum Delay Allowed (ns)';
num_lines = 1;
defAns = {'unit is nanosecond'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,defAns);
delay=str2num(answer{1,1});
delayt=answer{1,1};
k=1;
while length(preEAtimes)>3
mark=preEAtimes(1,3);
%para marca no sensor 1
if preEAtimes(1,1) == 1
ind=[2,3,4];%mudar manual
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(1)))
ix(1) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(1)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(2)))
ix(2) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(2)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(3)))
ix(3) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(3)), 1, 'first');
par(k,:)=preEAtimes(1,:) preEAtimes(ix(1,:)) preEAtimes(ix(2,:))
preEAtimes(ix(3,:));%mudar manual
k=k+1;
preEAtimes([1,ix(1),ix(2),ix(3),:]) = [];
else

```

```

preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
end
%fim da marca no sensor 1
%para marca no sensor 2
if preEAtimes(1,1) == 2
ind=[1,3,4];%mudar manual
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(1)))
ix(1) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(1)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(2)))
ix(2) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(2)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(3)))
ix(3) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(3)), 1, 'first');
par(k,:)=preEAtimes(ix(1,:)) preEAtimes(1,:) preEAtimes(ix(2,:))
preEAtimes(ix(3,:));%mudar manual
k=k+1;
preEAtimes([1,ix(1),ix(2),ix(3),:]) = [];
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
%fim da marca no sensor 2
%para marca no sensor 3
if preEAtimes(1,1) == 3
ind=[1,2,4];%mudar manual
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(1)))
ix(1) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(1)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(2)))
ix(2) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(2)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(3)))
ix(3) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(3)), 1, 'first');

```

```

== ind(3), 1, 'first');
par(k,:)=preEAtimes(ix(1),:) preEAtimes(ix(2),:) preEAtimes(1,:);
preEAtimes(ix(3),:);%mudar manual
k=k+1;
preEAtimes([1,ix(1),ix(2),ix(3),:] = [];
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
end
%fim da marca no sensor 3
%para marca no sensor 4
if preEAtimes(1,1) == 4
ind=[1,2,3];%mudar manual
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(1)))
ix(1) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(1)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(2)))
ix(2) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(2)), 1, 'first');
if any((preEAtimes(:,3)<=mark+delay) &
(preEAtimes(:,1)==ind(3)))
ix(3) = find((preEAtimes(:,3) <= mark+delay) & (preEAtimes(:,1)
== ind(3)), 1, 'first');
par(k,:)=preEAtimes(ix(1),:) preEAtimes(ix(2),:)
preEAtimes(ix(3),:) preEAtimes(1,:);%mudar manual
k=k+1;
preEAtimes([1,ix(1),ix(2),ix(3),:] = [];
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
else
preEAtimes(1,:) = [];
end
end
%fim da marca no sensor 4
end
paresc=[par(:,3) par(:,6) par(:,9) par(:,12)];
clearvars -except paresc T scord name delayt;
load('coordenadasDosTargets.mat');
load('sensores.mat');
for i=1:length(paresc)
dtj(i,:)=paresc(i,1)-paresc(i,2) paresc(i,1)-paresc(i,3) paresc(i,1)-
paresc(i,4) paresc(i,2)-paresc(i,3) paresc(i,2)-paresc(i,4)
paresc(i,3)-paresc(i,4);
temp = paresc(i,:);
[~,I] = sort(temp);
proxArea(i,:) = [I(1) I(2)];
end
for i=1:4
scorp(i,:)=[coordpol(i,4) coordpol(i,2) coordpol(i,3)];
end
preTHETA=scorp(:,2);
THETA=degtorad(preTHETA);
RHO=scorp(:,3);
Z=scorp(:,1);
[X,Y,Z]=pol2cart(THETA,RHO,Z);
scord=[X,Y,Z];
for i=1:length(ocordc)
for j=1:length(scord)
dis(j)=CalcDistance(scord(j,:), ocordc(i,:));
end
[val, ind]=sort(dis);
prox(i,:)=ind(1),ind(2)];
end
prompt = {'Would you like to turn on additional setting on?:'};
dlg_title = 'Location Mode';
num_lines = 1;

```

```

defAns = {'off'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,defAns);
complicometro=answer{1,1};
[pontos,ia,ib] = intersect(prox,proxArea,'rows');
for i=1:length(ia)
ocordci(i,:)=ocordc(ia(i,:));
end
h = waitbar(0,'Please wait...');
for j=1:length(dtj)
T=dtj(j,:);
if strcmp(complicometro,'off')
for i=1:size(ocordci,1) %calcular coordenadas para cada ponto
da matriz como x0
x0=ocordci(i,:);
[a,b]=oCoorsimul(x0,[-21,-21,-80],[21,21,0]);
cpo(i,:)=a b;
end
elseif strcmp(complicometro,'on')
for i=1:size(ocordci,1) %calcular coordenadas para cada ponto
da matriz como x0
x0=ocordci(i,:);
if (proxArea(j,:) == [1,2]) | (proxArea(j,:) == [2,1])
[a,b]=oCoorsimul(x0,[-21,-21,-25],[21,21,0]);
cpo(i,:)=a b;
elseif (proxArea(j,:) == [1,3]) | (proxArea(j,:) == [1,4]) |
(proxArea(j,:) == [2,3]) | (proxArea(j,:) == [2,4]) | (proxArea(j,:) ==
[3,1]) | (proxArea(j,:) == [4,1]) | (proxArea(j,:) == [3,2]) |
(proxArea(j,:) == [4,2])
[a,b]=oCoorsimul(x0,[-21,-21,-59],[21,21,-25]);
cpo(i,:)=a b;
elseif (proxArea(j,:) == [3,4]) | (proxArea(j,:) == [4,3])
[a,b]=oCoorsimul(x0,[-21,-21,-80],[21,21,-59]);
cpo(i,:)=a b;
end
end
end
abs=min(cpo(:,4));
idx=find(cpo(:,4)==abs);
EAcoor(j,:)=cpo(idx(1),1) cpo(idx(1),2) cpo(idx(1),3);
waitbar(j/size(dtj,1))
end
delete(h)
close all;
R=[21 21];
N=200;
[X,Y,Z] = cylinder(R,N);
Z(2,:) = -80;
testsubject = surf(X,Y,Z);
set(testsubject,'FaceColor','green','FaceAlpha',0.2,'EdgeColor','y
ellow','EdgeAlpha',0.1,...
'DiffuseStrength',1,'AmbientStrength',1)
hold;
scatter3(EAcoor(:,1),EAcoor(:,2),EAcoor(:,3), 'blue')
if strcmp(complicometro,'off')
fname=strcat('01','_',delayt,'_',name);
elseif strcmp(complicometro,'on')
fname=strcat('02','_',delayt,'_',name);
end
save(fname, 'EAcoor');

```

Exemplo de RFPA (2MPa)

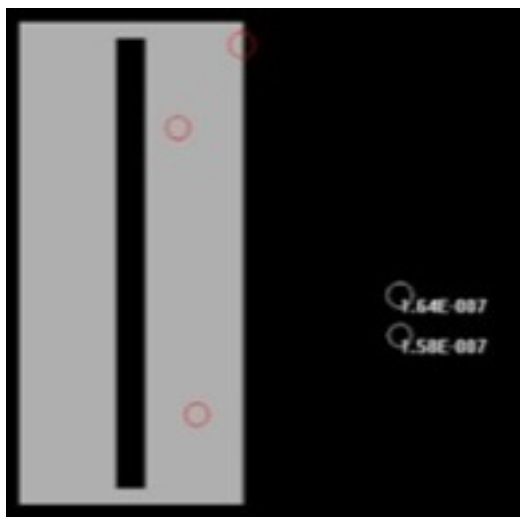


Figura 4 - Simulação RFPA 2MPa Conf. - 8 MPa

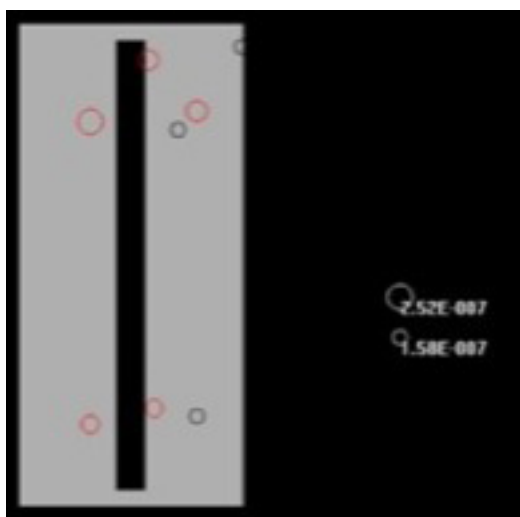


Figura 5 - Simulação RFPA 2MPa Conf. - 9 MPa

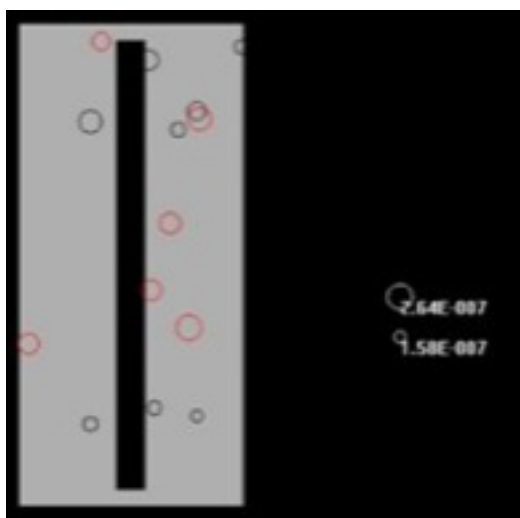


Figura 6 - Simulação RFPA 2MPa Conf. - 10 MPa

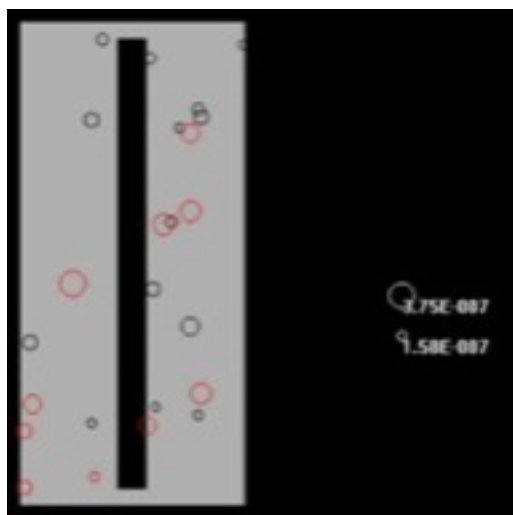


Figura 7 - Simulação RFPA 2MPa Conf. - 11 MPa

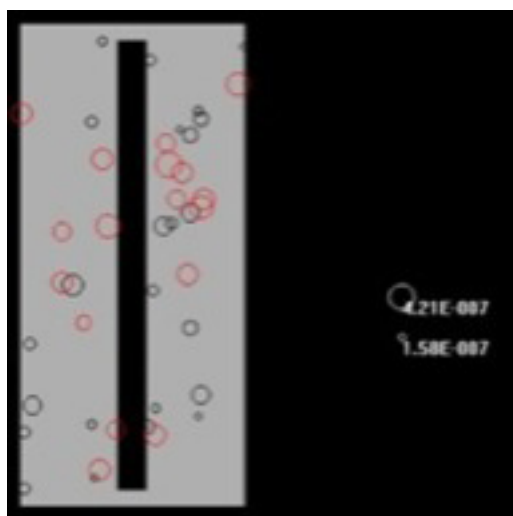


Figura 8 - Simulação RFPA 2MPa Conf. - 12 MPa

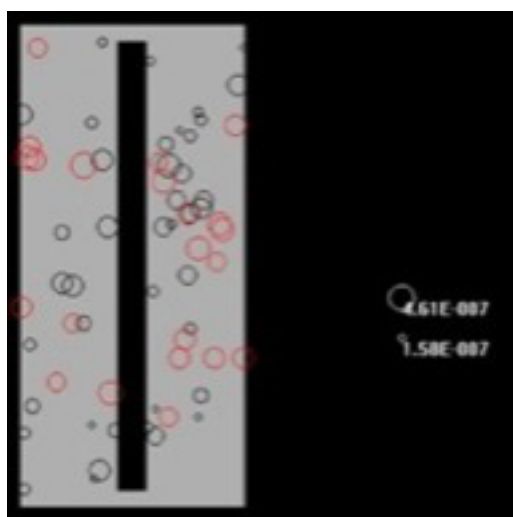


Figura 9 - Simulação RFPA 2MPa Conf. - 13 MPa

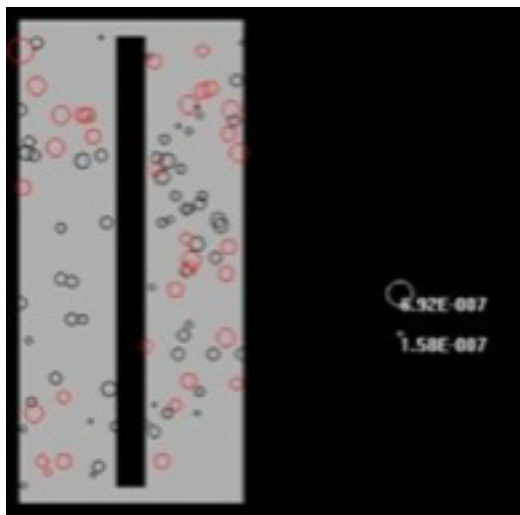


Figura 10 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 14 MPa

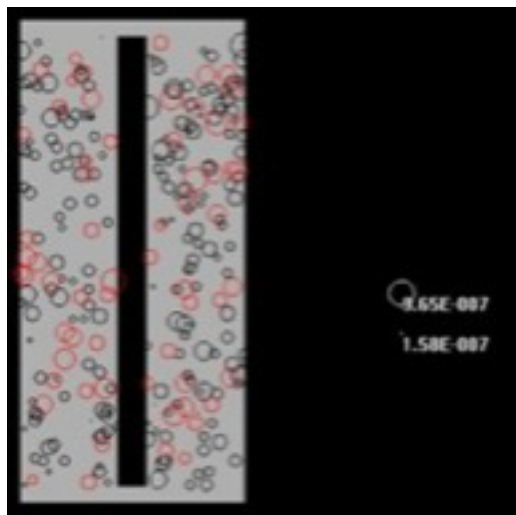


Figura 13 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 17 MPa

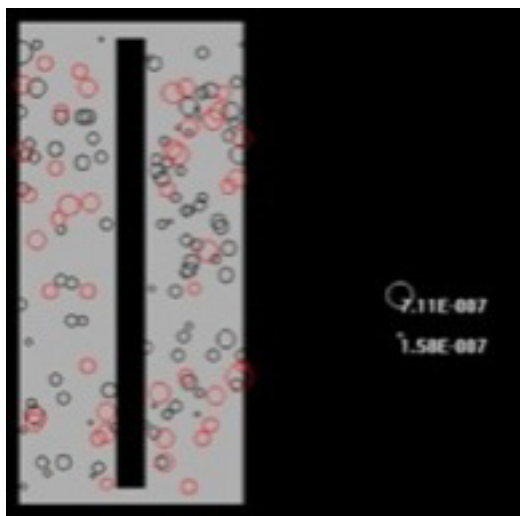


Figura 11 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 15 MPa

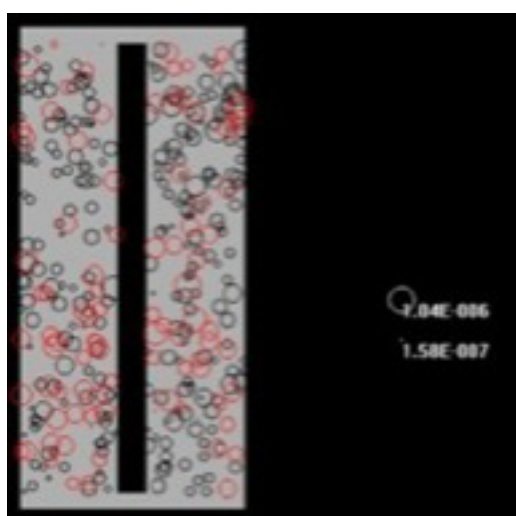


Figura 14 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 18 MPa

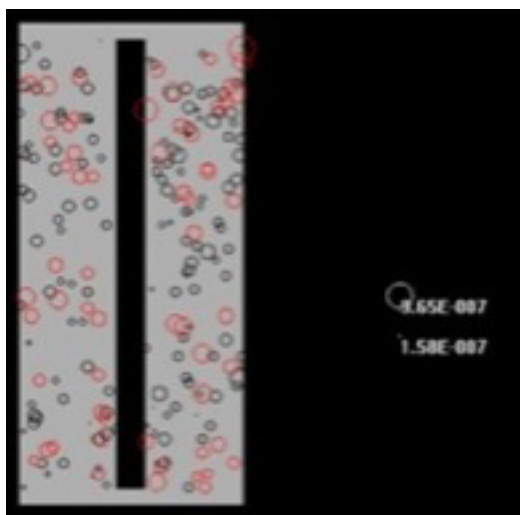


Figura 12 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 16 MPa



Figura 15 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 19 MPa

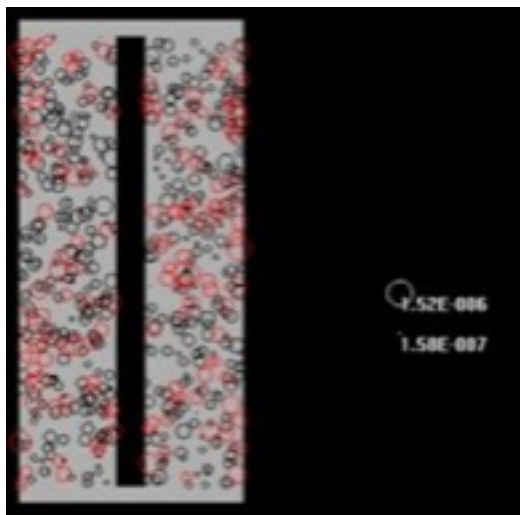


Figura 16 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 20 MPa

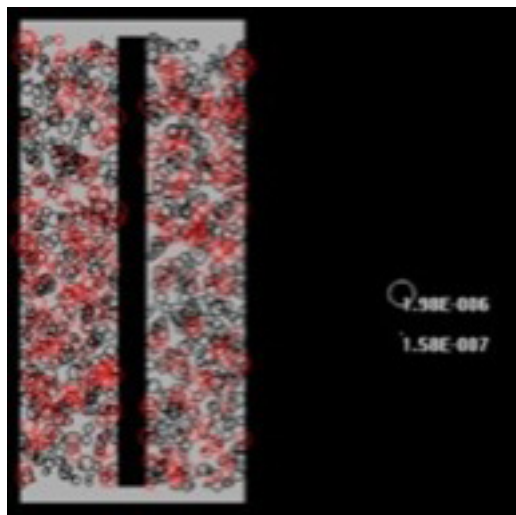


Figura 19 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 23 MPa

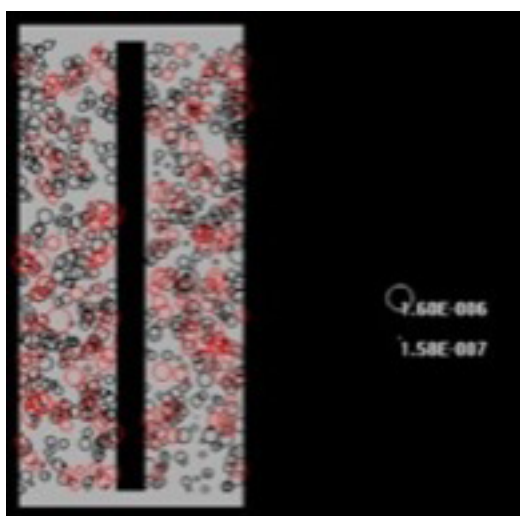


Figura 17 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 21 MPa



Figura 20 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 24 MPa

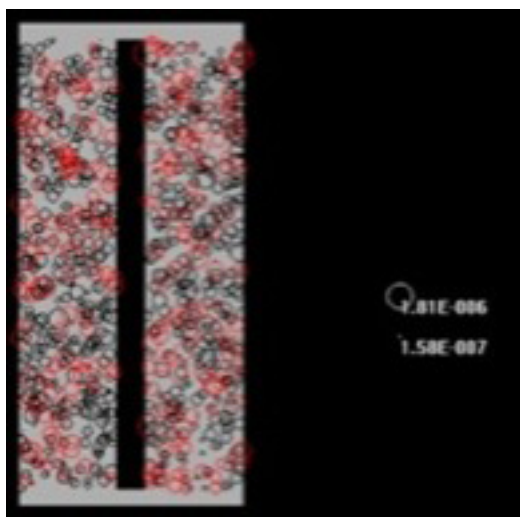


Figura 18 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 22 MPa

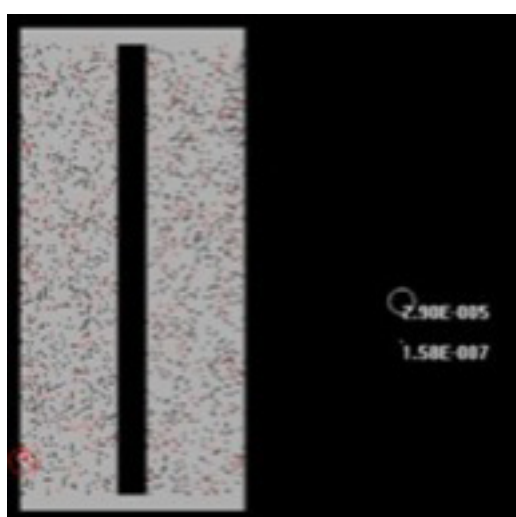


Figura 21 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 25 MPa

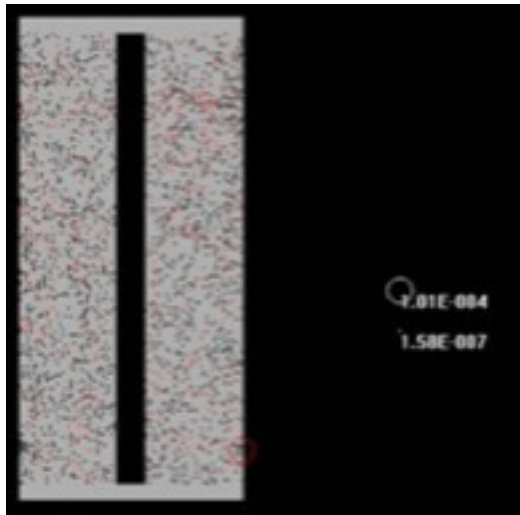


Figura 22 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 26 MPa

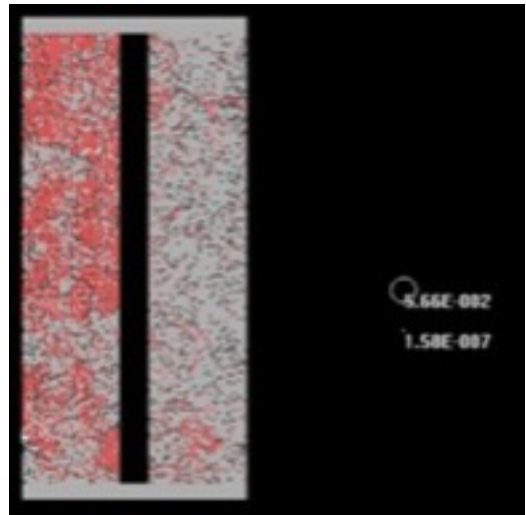


Figura 25 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 26 MPa

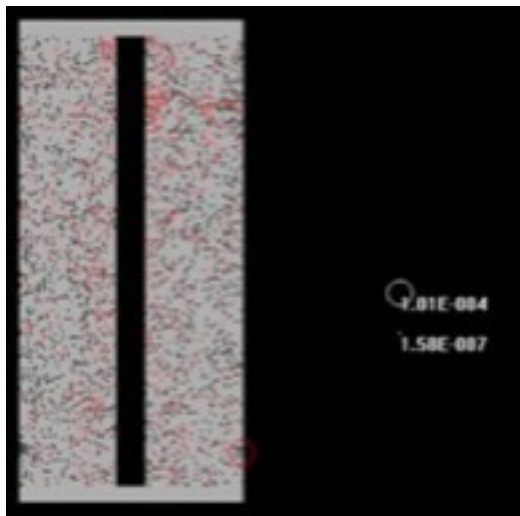


Figura 23 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 26 MPa

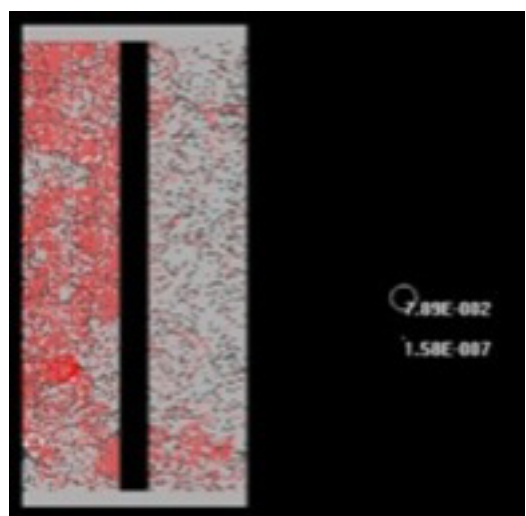


Figura 26 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 26 MPa

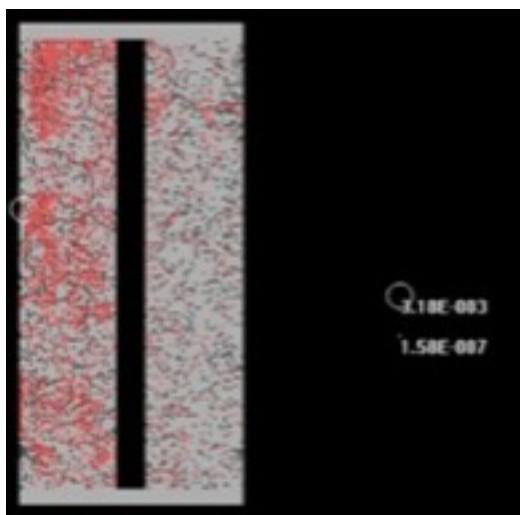


Figura 24 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 26 MPa

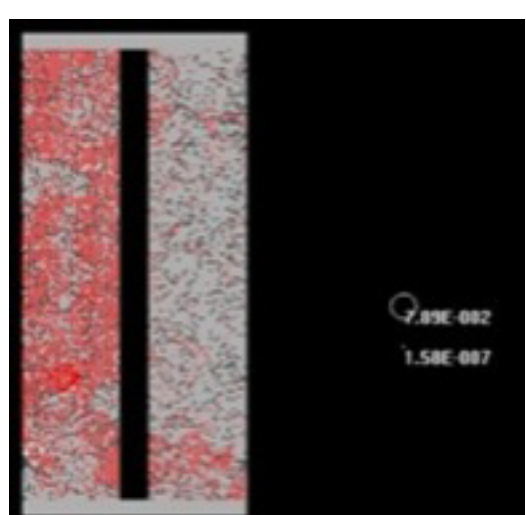


Figura 27 - Simulação RFA 2MPa Conf. - 26 MPa

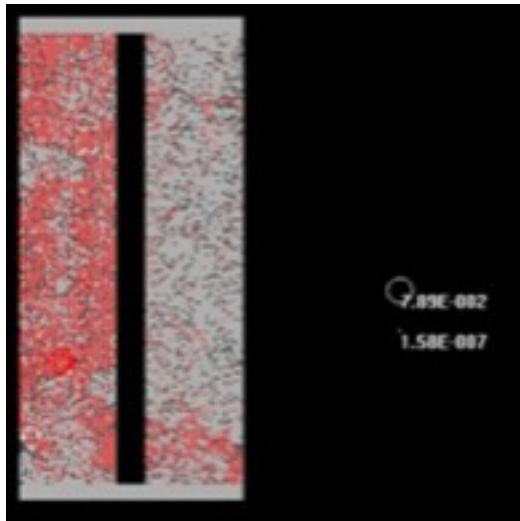


Figura 28 - Simulação RFLPA 2MPa Conf. - 26 MPa

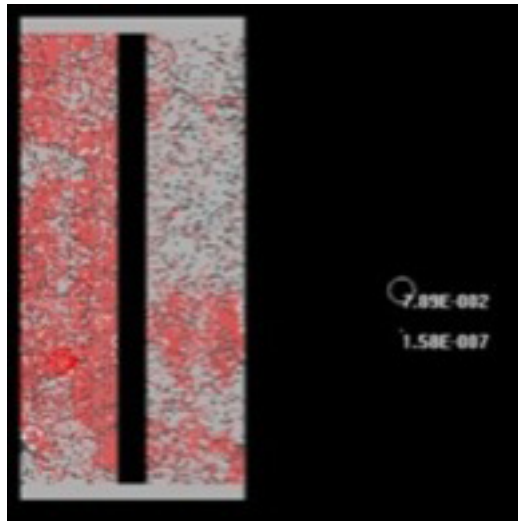


Figura 31 - Simulação RFLPA 2MPa Conf. - 26 MPa

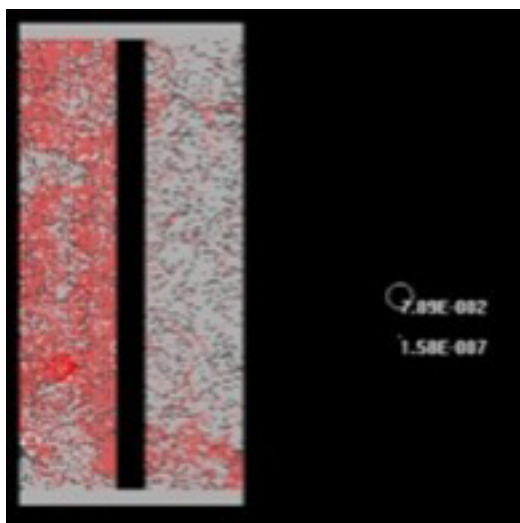


Figura 29 - Simulação RFLPA 2MPa Conf. - 26 MPa

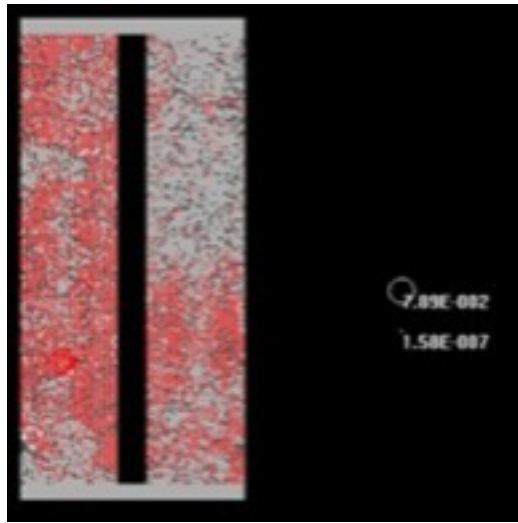


Figura 32 - Simulação RFLPA 2MPa Conf. - 26 MPa

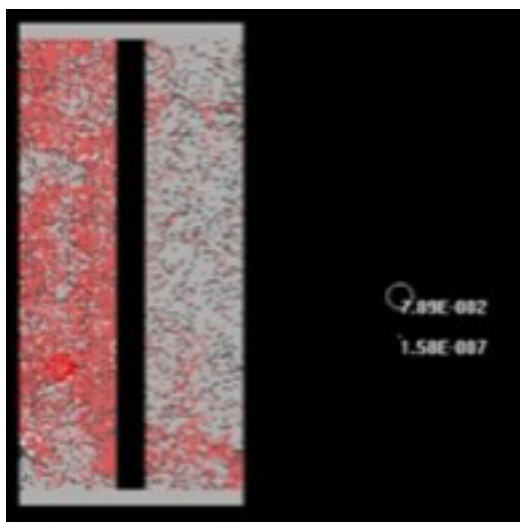


Figura 30 - Simulação RFLPA 2MPa Conf. - 26 MPa

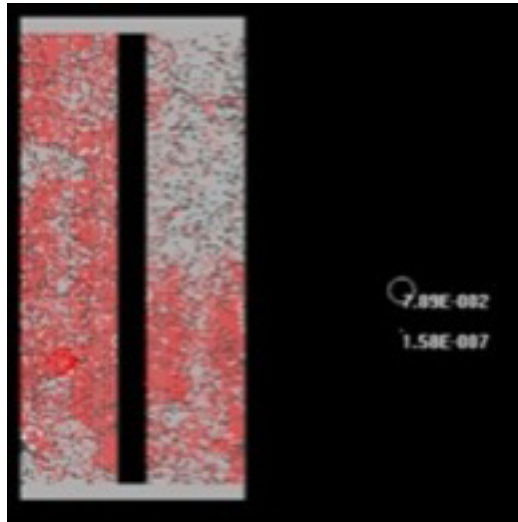


Figura 33 - Simulação RFLPA 2MPa Conf. - 26 MPa

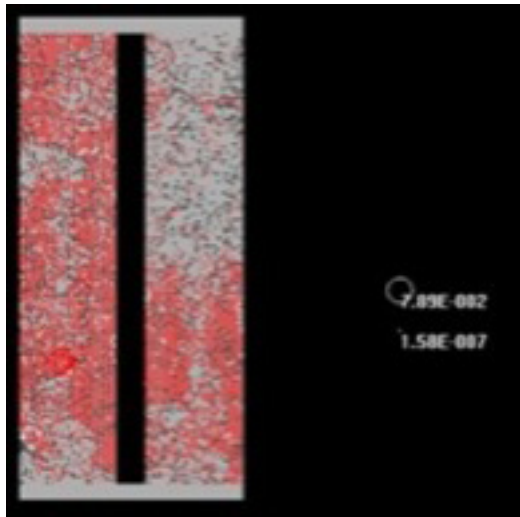


Figura 34 - Simulação RFPa 2MPa Conf. - 26 MPa

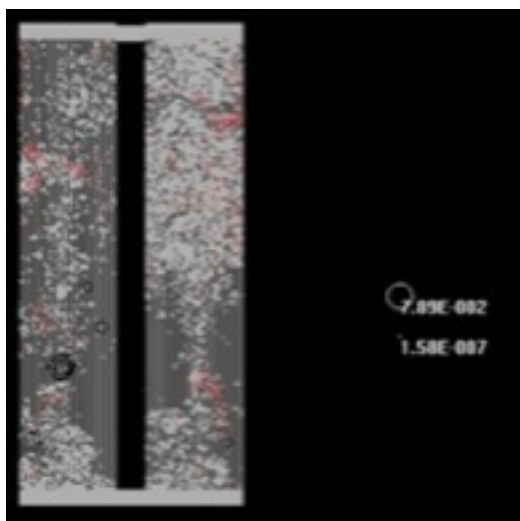


Figura 35 - Simulação RFPa 2MPa Conf. - 27 MPa, Pós-Rotura.

EA Localizadas nos ECO

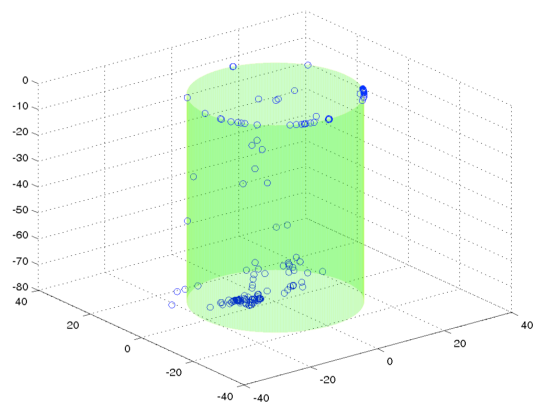


Figura 36 – EA Localizadas PV25

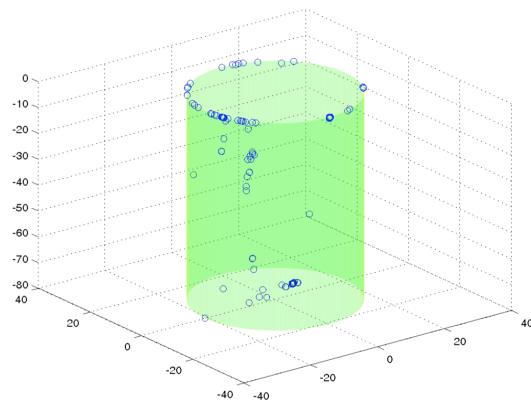


Figura 37 – EA Localizadas PV26

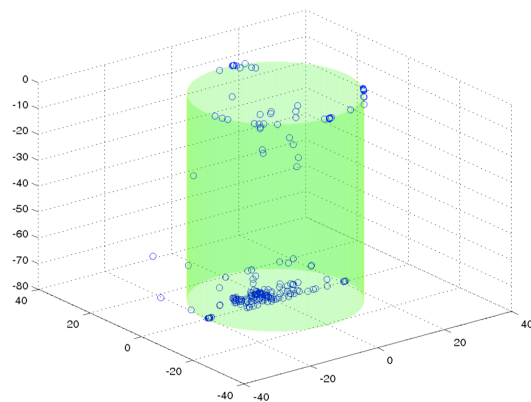


Figura 38 – EA Localizadas PV29

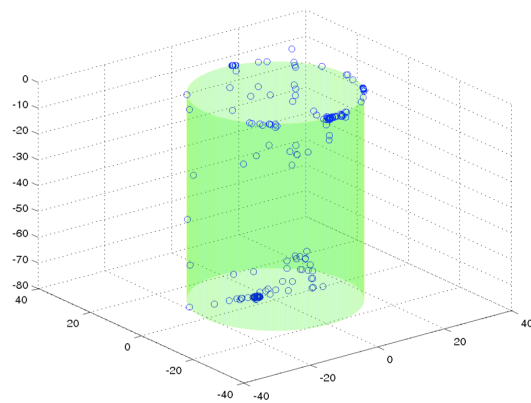


Figura 39 – EA Localizadas PV30

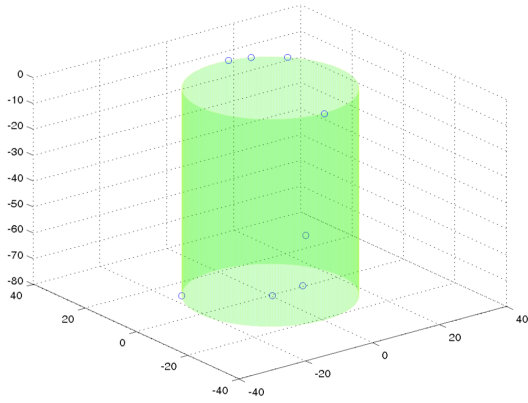


Figura 40 – EA Localizadas PV31

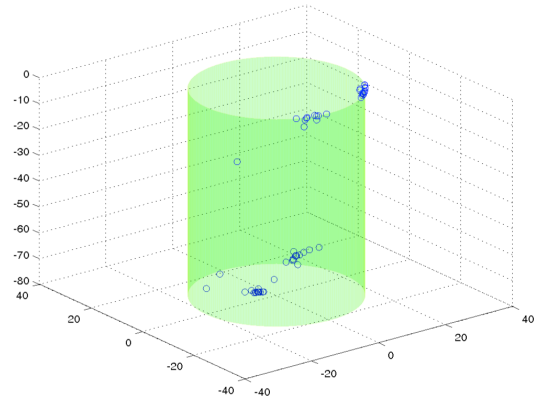


Figura 43 – EA Localizadas PV36

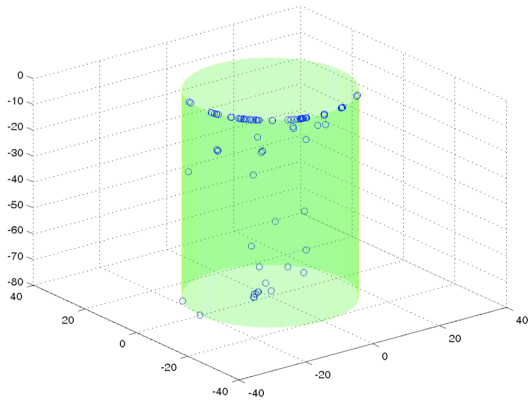


Figura 41 – EA Localizadas PV32

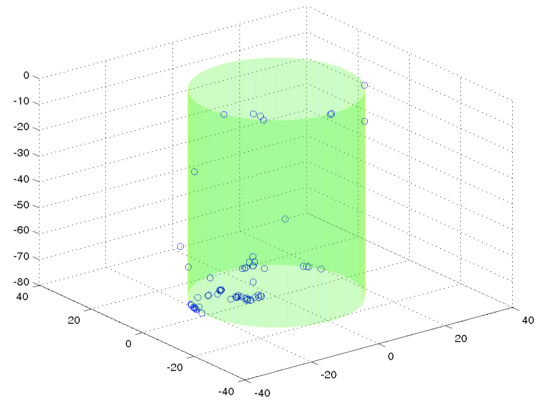


Figura 44 – EA Localizadas PV37

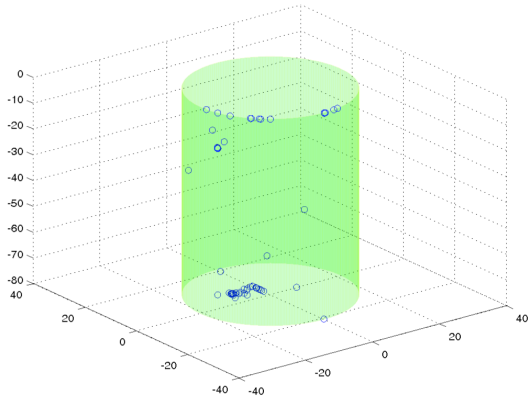


Figura 42 – EA Localizadas PV35

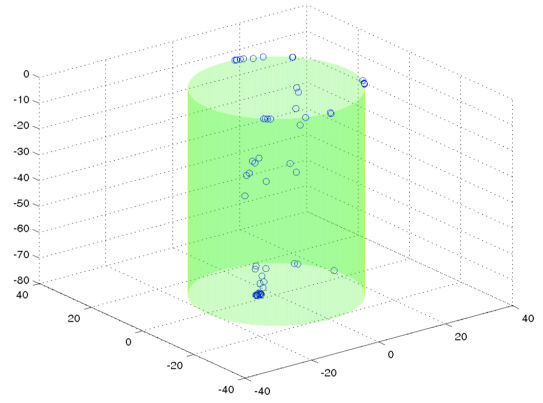


Figura 45 – EA Localizadas PV38

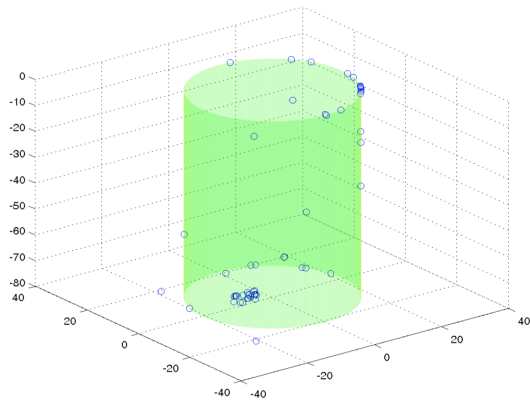


Figura 46 – EA Localizadas PV39

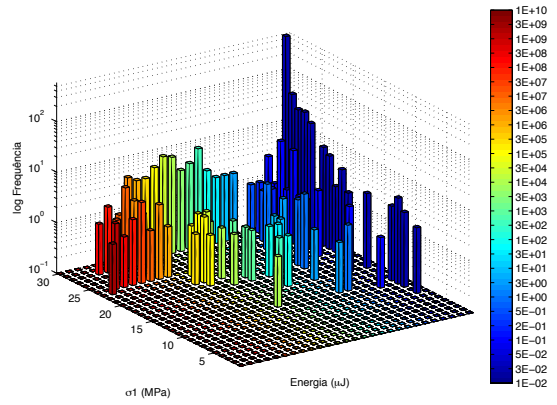


Figura 49 – Energia PV26

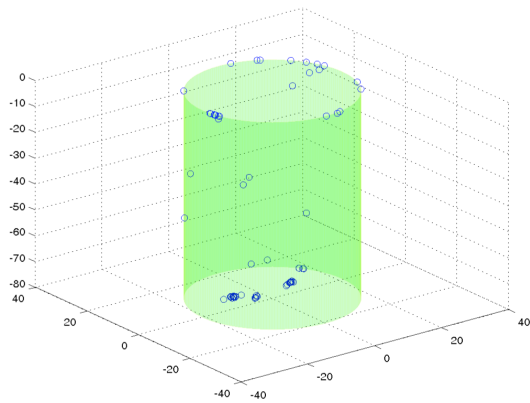


Figura 47 – EA Localizadas PV40

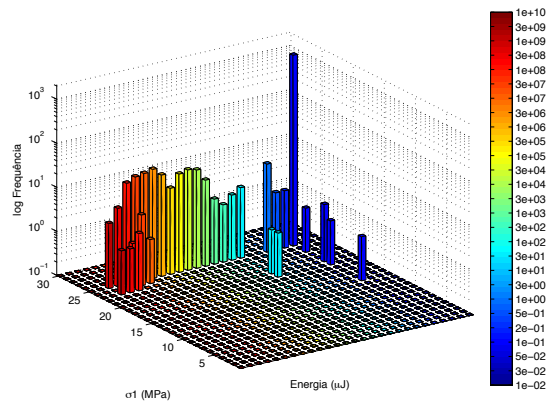


Figura 50 – Energia PV29

Perfis Energéticos dos ECO

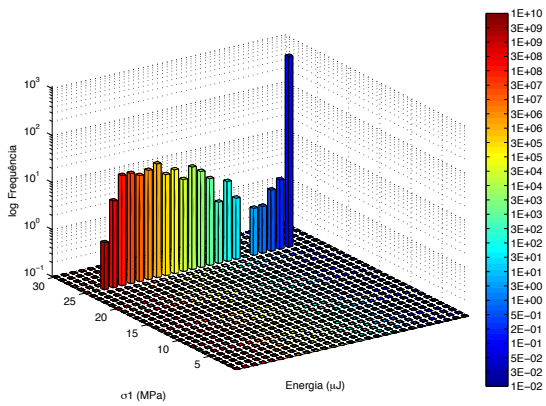


Figura 48 – Energias PV25

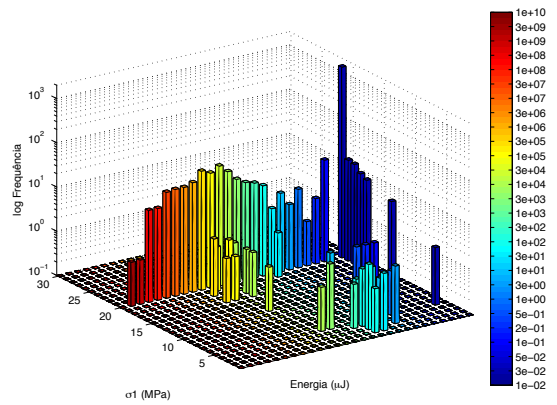


Figura 51 – Energias PV30

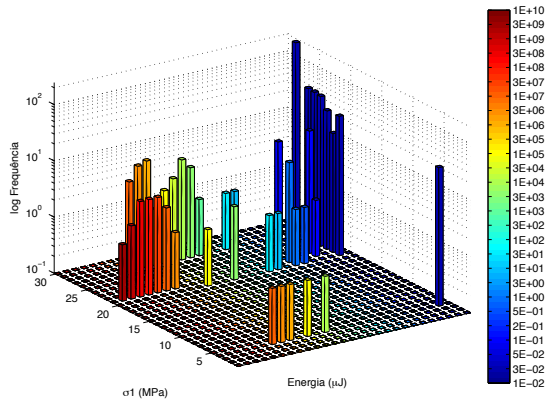


Figura 52 – Energias PV32

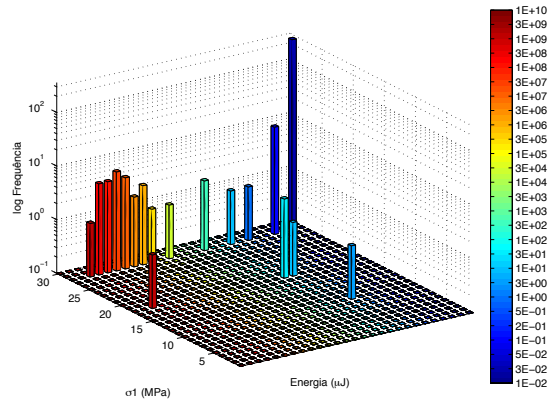


Figura 55 – Energia PV37

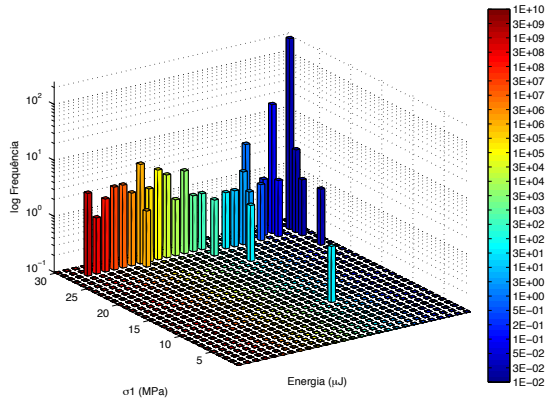


Figura 53 – Energias PV35

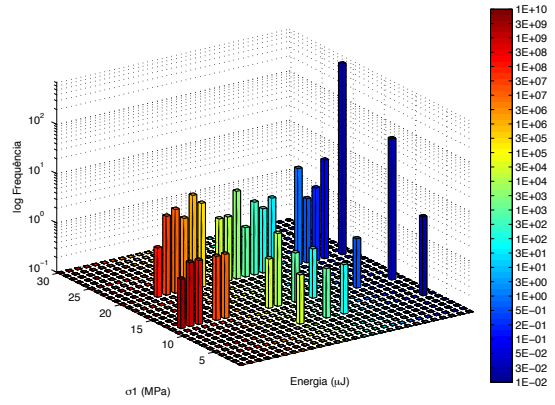


Figura 56 – Energias PV38

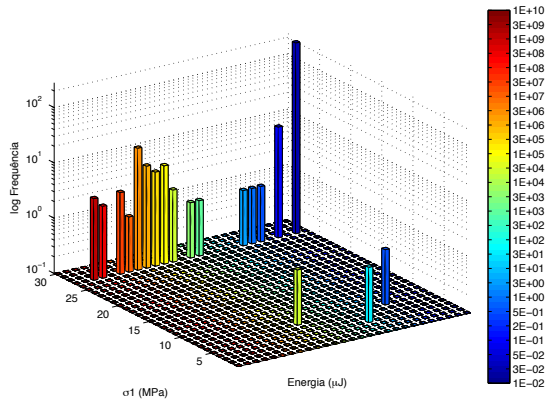


Figura 54 – Energia PV36

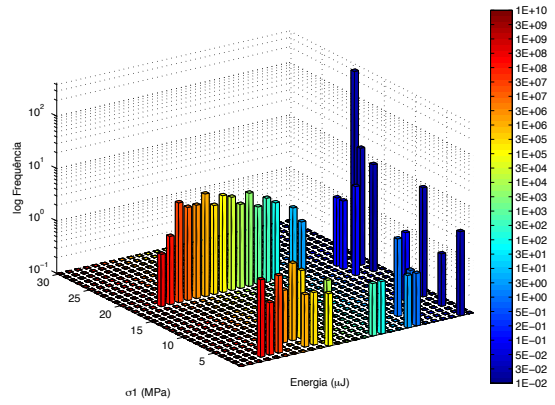


Figura 57 – Energias PV39

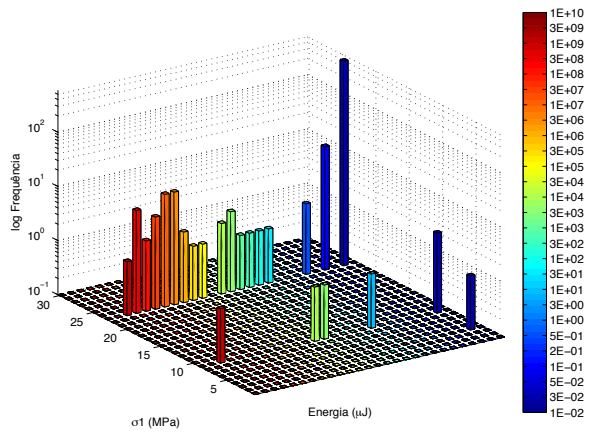


Figura 58 – Energias PV40