

# SÍSMICA 2024



13º Congresso Nacional  
de Sismologia e Engenharia Sísmica

📍 Universidade do Minho, Guimarães

## EDITORES

Daniel V. Oliveira  
Paulo B. Lourenço  
Luís Guerreiro  
Rui A. Silva



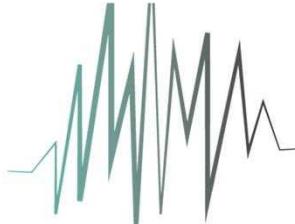
Universidade do Minho  
Escola de Engenharia



# Atas do 13º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica

17-19 de abril de 2024, Guimarães, Portugal

**SÍSMICA  
2024**



13º Congresso Nacional  
de Sismologia e Engenharia Sísmica

**Editores:**

Daniel V. Oliveira, Paulo B. Lourenço, Luís Guerreiro, Rui A. Silva

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação ou das informações aqui contidas pode ser reproduzida, armazenada em sistema de recuperação ou transmitida de qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, por fotocópia, gravação ou outro, sem permissão prévia por escrito do editor.

Os artigos desta Ata são publicados na forma submetida pelos autores após revisão científica. Foram feitas pequenas alterações no caso de erros e discrepâncias óbvias detetados.

Os editores não assumem qualquer responsabilidade pelo conteúdo dos artigos e possíveis imprecisões. Embora todos os cuidados tenham sido tomados para garantir a integridade e qualidade desta publicação e das informações aqui contidas, nenhuma responsabilidade será assumida pelos editores ou pelo autor por qualquer dano a propriedades ou pessoas como resultado da operação ou uso desta publicação e pelas informações desta publicação.

@ Universidade do Minho  
Escola de Engenharia  
Guimarães, Portugal

## Patrocinadores:



PRETENSA



A Simpson Strong-Tie® Company

**ISBN:** 978-989-35653-0-8



Universidade do Minho  
Departamento de Engenharia Civil, Azurém  
P-4800-058 Guimarães  
tel.: 253 510 498  
email: sec.estruturas@civil.uminho.pt

## PREFÁCIO

O 13º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica (SÍSMICA 2024), organizado pela Universidade do Minho em colaboração com a Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, surge na sequência da série de congressos nacionais dedicados aos problemas e desafios que a sismologia e a engenharia sísmica colocam constantemente. O congresso SÍSMICA 2024 constitui, assim, um fórum de excelência de debate e divulgação dos desenvolvimentos mais recentes no âmbito da investigação e prática da sismologia e da engenharia sísmica, oferecendo um ambiente propício à troca de ideias e atualização de conhecimentos.

As atas do congresso SÍSMICA 2024 incluem 79 artigos, correspondentes a 4 palestras convidadas apresentadas em sessões plenárias, e a 75 artigos organizados em 4 sessões temáticas e 9 sessões técnicas, alinhadas com os atuais desafios da sismologia e engenharia sísmica em Portugal, e apresentados em sessões paralelas. Todos os artigos das sessões temáticas e técnicas foram sujeitos a um processo de revisão pelos membros da Comissão Científica, a quem se agradece trabalho meticuloso de revisão. É de assinar o elevado nível de internacionalização deste congresso, tendo 40% dos artigos sido escritos em inglês.

O congresso SÍSMICA 2024 inclui uma sessão plenária, em língua inglesa, dedicada à apresentação e discussão dos impactos dos sismos no património construído europeu, constituída por 2 palestras convidadas, focadas no sismo de 2023 da Turquia e as lições para Portugal, e na experiência e lições aprendidas com os sismos ocorridos em Itália nos últimos 20 anos, respetivamente. Este congresso inclui ainda uma sessão plenária dedicada à cerimónia de entrega do prestigiado Prémio Carlos Sousa Oliveira 2024, promovido pela Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica.

No âmbito do congresso SÍSMICA 2024, foi criado e atribuído o “Prémio Jovem Apresentador” para distinguir a melhor apresentação realizada por um jovem investigador. Espera-se que esta iniciativa possa vingar e que ajude a distinguir jovens talentos na área da sismologia e engenharia sísmica.

Por fim, agradece-se aos patrocinadores o apoio concedido ao congresso SÍSMICA 2024. A sua contribuição foi importante para o sucesso do congresso, ajudando a alcançar um alto nível de excelência em todas as atividades realizadas e garantindo uma experiência enriquecedora a todos os participantes.

Daniel V. Oliveira

Presidente da Comissão Organizadora

Paulo B. Lourenço

Presidente da Comissão Científica

## COMISSÃO ORGANIZADORA

Daniel V. Oliveira, UMinho, Presidente  
Paulo B. Lourenço, UMinho  
Luís Guerreiro, SPES  
Rui A. Silva, UMinho

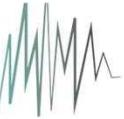
## COMISSÃO CIENTÍFICA

Paulo B. Lourenço, UMinho, Presidente  
Alexandra Carvalho, LNEC  
Alexandre Costa, ISEP  
Alfredo C. Costa, LNEC  
Aníbal Costa, UAveiro  
António A. Correia, LNEC  
António Arêde, FEUP  
Carlos Chastre, UNLisboa  
Carlos Rebelo, UCoimbra  
Carlos S. Oliveira, IST  
Cristina Oliveira, IPSetubal  
Daniel V. Oliveira, UMinho  
Eduardo C. Carvalho, GAPRES  
Francisco Fernandes, LREC  
Graça Vasconcelos, UMinho  
Hugo Rodrigues, UAveiro  
Humberto Varum, FEUP  
João Appleton, A2P  
João Azevedo, IST  
João Estêvão, UAlgarve  
João G. Ferreira, IST

João M. Guedes, FEUP  
Jorge M. Proença, IST  
José M. Castro, FEUP  
Luís Guerreiro, IST  
Luís Matias, FCUL  
Mário Lopes, IST  
Mónica Ferreira, IST  
Mourad Bezzeghoud, UEvora  
Nuno Mendes, UMinho  
Paulo Candeias, LNEC  
Paulo Providência, UCoimbra  
Ricardo Costa, UCoimbra  
Rita Bento, IST  
Rui C. Gomes, IST  
Rui Calçada, FEUP  
Rui Faria, FEUP  
Tiago Ferreira, UWE  
Tiago Ribeiro, Tal Projeto  
Vasco Bernardo, UMinho  
Vitor Silva, UAveiro  
Xavier Romão, FEUP

## SECRETARIADO

Ana Fonseca  
Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
4800-058 Guimarães - Portugal  
Tel +351 253 510 498  
Email: [info@sismica2024.pt](mailto:info@sismica2024.pt)



## ÍNDICE

### Palestras

On the use of seismic risk parameters to define and optimise retrofitting of buildings based on multiple criteria <i>Ricardo Monteiro</i>	3
Unveiling the power of ground motion simulations: bridging the gap between seismology and engineering challenges <i>Shaghayegh Karimzadeh</i>	19
Avaliação da segurança sísmica de edifícios de alvenaria. aspectos gerais da segunda geração do Eurocódigo 8 – Parte 3 <i>Rita Bento</i>	39
Projeto sísmico de estruturas de betão – desafios e soluções <i>António Costa</i>	59

### Projeto STAND4HERITAGE

A preliminary simplified approach for the rapid seismic vulnerability assessment of residential unreinforced masonry buildings in urban centres prone to liquefaction <i>Alejandro Cruz, Nicola Chieffo, Shaghayegh Karimzadeh, Albert Ortiz, Eimar Sandoval, Paulo B. Lourenço</i>	85
Combined settlement and tilting testing apparatus: design and preliminary testing <i>Eduarda Vila-Chã, Alberto Barontini, Paulo B. Lourenço</i>	97
Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand models of historical masonry buildings considering in-plane and out-of-plane response <i>Daniel Caicedo, Shaghayegh Karimzadeh, Vasco Bernardo, Paulo B. Lourenço</i>	107
Probabilistic seismic vulnerability assessment of URM walls in Europe <i>Vasco Bernardo, Alfredo C. Costa, Paulo B. Lourenço</i>	119
Site-based stochastic ground motion simulation based on white noise modification <i>Sayed M. S. Hussaini, Shaghayegh Karimzadeh, Paulo B. Lourenço</i>	131
Statistical analysis of the European ground motion dataset and recommendations for data enhancement <i>Sayed M. S. Hussaini, Daniel Caicedo, Shaghayegh Karimzadeh, Paulo B. Lourenço</i>	143

## Caracterização mecânica da alvenaria em Portugal

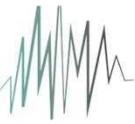
A database of mechanical properties of two-leaf stone masonry walls updated by means of bayesian inference <i>Antonio Murano, Javier Ortega, Hugo Rodrigues, Graça Vasconcelos</i>	159
Caracterização construtiva e mecânica de paredes de alvenaria de pedra tradicional <i>Fernando Pinho</i>	171
Caracterização da alvenaria tradicional de pedra existente no Algarve <i>João M. C. Estêvão, Alfredo Braga</i>	183
Caracterização mecânica de alvenaria de pedra ordinária Portuguesa através de dados experimentais - Estudo Preliminar <i>Daniel Melo, António Simões, Graça Vasconcelos, Rita Bento</i>	193
Caracterização mecânica de painéis de alvenaria tradicional dos edifícios dos Açores com diferentes técnicas de reforço <i>Lisandra Miranda, Vidália Miranda, João Pimentel, Luís Teixeira</i>	205

## Construção modular e sismos

Análise sismica de edifícios pré-fabricados com solução de sistema híbrido madeira/betão CREE <i>Miguel Pires, João Morgado Eira</i>	219
Construção modular com madeira: Normalização e recomendações para a sua conceção e projeto sísmicos <i>Victor Belafonte, Marina Tenório, Nuno Neves, Jorge M. Branco</i>	231
Desafios na simulação numérica de construções modulares pré-fabricadas em betão armado <i>André Furtado, Romain Sousa, Ricardo Carmo, Eduardo Júlio</i>	243
Dimensionamento sísmico de estruturas modulares em aço <i>Rita Peres, Cyrus Eshaghi, Elisa Cerqueira, José Miguel Castro</i>	255
Ductility assessment in an innovative CLT connection <i>Zabih Mehdipour, Elisa Poletti, André C. Fontes, Paolo Grossi, Ricardo Braz, Jorge M. Branco</i>	267

## Reforço sísmico e energético de edifícios

A framework for integrated retrofitting of existing buildings <i>Rita Couto, Gianrocco Mucedero, Rita Bento, Ricardo Monteiro</i>	281
--	-----



---

Avaliação experimental do comportamento para fora-do-plano de paredes de enchimento com reforço integrado sísmico e energético <i>André Furtado, Hugo Rodrigues, António Arêde, Humberto Varum</i>	295
Caracterização experimental de matrizes TRM sustentáveis para reabilitação sísmica e energética <i>Luca Penazzato, Rogiros Illampas, Daniel V. Oliveira</i>	305
Integrated seismic and energy upgrading of masonry-infilled RC frame structures using textile-reinforced mortars combined with thermal insulation <i>Christiana A. Filippou, Christis Z. Chrysostomou, Renos Votsis, Nicholas Kyriakides, Rogiros Illampas, Stathis Bousias</i>	317
Modelação numérica do comportamento sísmico e energético de um edifício de alvenaria <i>Rafael Saraiva, Ana Marta Carneiro, Pedro Gonçalves, Ana Cristina Ferreira, Senhorinha Teixeira, Daniel V. Oliveira</i>	327
Reforço integrado sísmico e energético para envolventes de edifícios de betão armado: Onde e como? <i>André Furtado, Hugo Rodrigues</i>	335

### Sismicidade, movimentos sísmicos e efeitos de sítio

Fonte do sismo de Marrocos de 2023 (Mw6.8) inferida a partir do cruzamento de dados sísmicos e geodésicos <i>Bento Caldeira, Mourad Bezzeghoud, Rui Oliveira, José Borges, Ines Hamak, Elisa Buforn</i>	351
Método computacional de geração de catálogos de sismos simulados <i>João Estêvão</i>	363
Parâmetros espectrais de fonte e de propagação, nas regiões do Vale do Tejo e Sul de Portugal - O parâmetro kappa de atenuação crustal <i>Daniela Henriques, Susana Custódio, Alexandra Carvalho</i>	373

### Avaliação da segurança, vulnerabilidade e risco sísmico

A plataforma LxReSist - uma ferramenta de avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque edificado <i>Cláudia Pinto, Monica Amaral Ferreira, Paula Pacheco, Carlos Ferreira, Hugo O'Neill, Miguel Inácio</i>	387
Análise de vulnerabilidade Sísmica de um edifício Pombalino: desafios e soluções <i>Fábio Ferreira, Cristina Oliveira</i>	397

---

Análise dos resultados do inquérito sobre a avaliação sísmica não linear de edifícios existentes em Portugal <i>Ana Simões, Rita Bento</i>	407
Analysing fragility curves derived using alternative ground motion selection procedures <i>Despoina Skoulidou, Xavier Romão</i>	423
Assessing the seismic vulnerability of historical cities: parametric evaluation of masonry buildings in the Mexico context <i>Rafael Ramírez Eudave, Tiago Miguel Ferreira, Romeu Vicente</i>	435
Comprehensive multi-risk assessment for the Lisbon metropolitan area <i>Glenda Mascheri, Nicola Chieffo, Xavier Romão, Paulo B. Lourenço</i>	445
Damage assessment of reinforced concrete (RC) structures based on modal parameters <i>Reihane Shafie Panah, Humberto Varum, Vitor Silva, José Melo, Xavier Romão</i>	457
Enhancing earthquake risk assessment in Portugal: a comprehensive analysis <i>Gonçalo Lopes, Vitor Silva, Catarina Costa, Romeu Vicente, Carlos Sousa Oliveira</i>	467
Innovative approaches for the estimation of road disruptions in urban contexts due to earthquakes <i>Catarina Costa, Vitor Silva, Gonçalo Lopes</i>	479
The benefits of low-cost sensors in rapid earthquake loss assessment <i>Vitor Silva, Amir Taherian, Romeu Vicente</i>	489

## Estudos experimentais

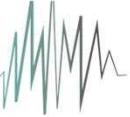
A critical overview of challenges in quasi-static testing of a two-story unreinforced masonry building <i>Abide Aşikoğlu, Graça Vasconcelos, Paulo B. Lourenço</i>	503
Avaliação experimental do comportamento biaxial de pilares de BA com armadura lisa <i>José Melo, Humberto Varum, António Arêde, Tiziana Rossetto</i>	515
Avaliação sísmica de edifícios de betão armado existentes nos Açores <i>João Pimentel, Vidália Miranda, Lisandra Miranda, Luís Teixeira</i>	525
Caracterização de ligações de painéis de fachada horizontais em edifícios industriais pré-fabricados em betão armado sob ações cíclica <i>Liana Ostetto, Jorge Fonseca, Romain Sousa, Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues</i>	539
Comportamento experimental de paredes de tabique rebocadas, submetidas a ações no plano: corte com compressão constante <i>Joana Teixeira, João Miranda Guedes, Bruno Quelhas</i>	549

---

Dimensionamento sísmico e esquema de ensaio experimental de uma subestrutura de ponte pré-fabricada em BA	561
<i>Lucas Carvalho, Mário Pimentel, Pedro Delgado, António Arêde, Nelson Vila Pouca, José R. Pinto</i>	
In-plane strengthening of a rammed earth wall with a compatible TRM-strengthening solution	573
<i>Antonio Romanazzi, Rui A. Silva, Alberto Barontini, Nuno Mendes, Daniel V Oliveira</i>	
Out-of-plane test of U-shaped brick masonry wall and proposal for strengthening	583
<i>Alberto Barontini, Antonio Murano, Jacopo Scacco, Luis C. Silva, Graça Vasconcelos, Paulo B. Lourenço</i>	
Reforço de ligações viga-pilar em estruturas pré-fabricadas de betão armado	593
<i>Nádia Batalha, Hugo Rodrigues, António Arêde, André Furtado, Romain Sousa, Humberto Varum</i>	

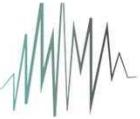
## Metodologias de dimensionamento sísmico, códigos e normas

Avaliação da rotação da corda de acordo com a 2ª geração do Eurocódigo 8 parte 1-1 utilizando análise não linear	603
<i>Helder Maranhão, Humberto Varum, José Melo</i>	
Avaliação do dimensionamento sísmico de estruturas metálicas segundo a nova versão do Eurocódigo 8	613
<i>José Fontão Carvalho, Vitor Monteiro, Tiago Ribeiro, Luís Macedo, José Miguel Castro</i>	
CRM - composite reinforced mortar - system to strengthen existing masonry buildings: practical design considerations about seismic their rehabilitation	625
<i>Allen Dudine, Luca Drigani, Erik Ulrix, Rogiros Illampas</i>	
Impacto da classe de ductilidade no projeto e dimensionamento sísmico de edifícios	637
<i>João Valente, Nelson Vila Pouca, Xavier Romão</i>	
Investigating the impact of Eurocode 8 revision on SMRF design and performance: a comparative study	651
<i>Melaku Seyoum Lemma, Carlos Rebelo, Luís Simões da Silva</i>	
Método das componentes cíclico para juntas viga-coluna metálicas	665
<i>Sara Oliveira, Ricardo Costa, Luís Simões da Silva</i>	
Relatório de avaliação da vulnerabilidade sísmica: requisito ou necessidade?	679
<i>Cláudia Pinto, Alexandre A. Costa, Rita Bento, António A. Correia</i>	



### Modelação e análise de estruturas

Análise numérica da resistência ao fogo após um sismo em estruturas de betão armado sem dimensionamento sísmico considerando diferente curvas de incêndio <i>Hugo Vitorino, Paulo Vila Real, Carlos Couto, Hugo Rodrigues</i>	691
Análise numérica do comportamento sísmico de um viaduto mexicano <i>Carlos Botelho, Pedro Delgado, António Arêde, Nelson Vila Pouca, José Barbosa</i>	703
Avaliação da vulnerabilidade sísmica da igreja de São Paulo, Ribeira Quente, Açores <i>Albino Silva, Nuno Mendes, Tiago Miguel Ferreira</i>	715
Avaliação dos efeitos de flexão biaxial em regime cíclico na capacidade de deformação de elementos tubulares de aço <i>Elisa Cerqueira, Cyrus Eshaghi, Rita Peres, José Miguel Castro</i>	727
Impact of fragile nonstructural elements on the cost-effective seismic design of steel MRFs <i>Seyed Amin Hosseini, Sandra Jordão, Carlos Rebelo, Chiara Bedon</i>	739
Influência das paredes fortes de alvenaria de enchimento no comportamento sísmico de edifícios de betão armado - análise estática não linear <i>Marta Agante, Hugo Rodrigues, Paulo Fernandes, Humberto Varum, Romain Sousa</i>	751
Insights about the impacts of the aspect ratio and strength of infills on the seismic performance of infilled RC frames <i>Hossamaldeen Mohamed, Xavier Romão</i>	762
Modelação das interações entre edifícios históricos adjacentes construídos em diferentes fases <i>Madalena Ponte, Andrea Penna, Rita Bento</i>	775
Modelação de muretes de alvenaria de pedra tradicional em compressão-corte utilizando modelos de partículas 2D: cargas monotónicas e cíclicas <i>Nuno Azevedo, Fernando F.S. Pinho, Ildi Cismasiu</i>	787
Modelação numérica e avaliação sísmica de um edifício porticado tipo de betão armado em lisboa – comparação de diferentes abordagens <i>António Simões, Rita Peres, Rita Bento</i>	799
Modelação por elementos finitos para avaliação sísmica de estruturas de alvenaria <i>Maria Laura Leonardi, Miguel Azenha, Daniel V. Oliveira</i>	811
Modelling of the behaviour of reinforced concrete under increasing cyclic loads <i>Mehdi Zahedi, Fariborz Nateghi Elahi</i>	821



Numerical modelling for the assessment of the out-of-plane behaviour of two-leaf stone masonry walls: FE based vs DEM-based approaches <i>Antonio Murano, Javier Ortega, Hugo Rodrigues, Graça Vasconcelos</i>	835
Preservation of stone masonry buildings: benchmarking of modelling approaches for seismic assessment and international call to action <i>Martijn Schildkamp, Rui Marques, Yoshikazu Araki, Stefano Silvestri</i>	847
Resposta sísmica não-linear de uma barragem abóbada com 300 m de altura. Avaliação da segurança estrutural (SBP e SMP) para diferentes cotas de água <i>Sérgio Oliveira, André Alegre, Rafael Ramos, Jorge Proença, Paulo Mendes</i>	859
Seismic performance of wall-to-horizontal diaphragm connections in historical constructions: modelling and application <i>Fabio Solarino, Daniel V. Oliveira, Linda Giresini</i>	873
Vulnerabilidade sísmica de turbina eólica offshore na costa portuguesa <i>Diogo Sousa, José Nuno Varandas</i>	883

### Reabilitação e reforço do património construído

Análise de risco sísmico do troço sul do claustro da Sé de Lisboa <i>Filipe Ribeiro, Alfredo Campos Costa, Aníbal Costa</i>	897
Effect of test setup on the tensile behavior of textile-reinforced mortar <i>Nima Azimi, Daniel V. Oliveira, Paulo B. Lourenço</i>	909

### Sistemas de controlo e isolamento sísmico

Estudo para comparação do desempenho e custo de edifícios com e sem isolamento de base – Aplicação ao novo edifício do hospital das forças armadas <i>Diogo Alves, Luís Guerreiro, António Câmara</i>	921
Observação e interpretação do comportamento dinâmico de barragens de betão <i>Jorge Pereira Gomes, José Vieira de Lemos, Sérgio Pereira, Álvaro Cunha</i>	933

### Prevenção, mitigação, educação e proteção civil

Identificação de mega roturas na vertente sobranceira à Fajã dos Cubres, ilha de São Jorge (Açores) – Proposta de monitorização <i>Paulo Amaral, Ana Malheiro, André Santos, Filipe Marques, Letícia Cunha</i>	953
---	-----

Risco sísmico em Almada: do diagnóstico ao planeamento e gestão do risco	965
<i>Filipe Ribeiro, Maria Luísa Sousa, António A. Correia, Delta Silva, Alexandra Carvalho, Marta Vicente, A. Aires, A. Godinho</i>	

## Geotecnia

Determinação da faixa de segurança no topo de taludes de natureza vulcânica com recurso a análise de estabilidade em condições estáticas e pseudoestáticas	979
<i>Paulo Amaral, Letícia Cunha, Filipe Marques, Ana Malheiro, André Santos</i>	

## FONTE DO SISMO DE MARROCOS DE 2023 (MW6.8) INFERIDA A PARTIR DO CRUZAMENTO DE DADOS SÍSMICOS E GEODÉSICOS

**BENTO CALDEIRA**  
Investigador  
Universidade de Évora

**JOSÉ BORGES**  
Investigador  
Universidade de Évora

**MOURAD BEZZEGHOUD**  
Investigador  
Universidade de Évora

**INES HAMAK**  
Estudante PhD  
Universidade de Évora

**RUI OLIVEIRA**  
investigador  
Universidade de Évora

**ELISA BUFORN**  
Investigador  
Universidade Complutense de  
Madrid

### SUMÁRIO

No dia 8 de setembro de 2023 às 22:11 UTC um sismo de magnitude 6.8 com epicentro junto da aldeia Talat N'Yaaqoub, província de Al Haouz (Marrocos), região do Alto Atlas, sacudiu violentamente toda a zona epicentral num raio de mais de 70km, afetando seriamente as estruturas de mais de 78000 edifícios e produzindo aproximadamente 5600 feridos e cerca de 3000 vítimas mortais. Este trabalho apresenta parte do estudo pormenorizado da fonte deste sismo a partir da interpretação de dados sísmicos e geodésicos, aplicando um cruzamento de métodos. Os resultados revelam uma rotura com início a 24km de profundidade que evolui durante cerca de 10 s, sobre um plano de falha sub-vertical orientado ENE-WSW com a pendente para NNW. Os deslizamentos sobre o plano de falha são maioritariamente ascendentes (inversos) mas com uma componente horizontal no sentido WSW (de desligamento esquerdo). O momento sísmico total libertado por esta fonte foi de  $M0=2.8\times10^{19}\text{Nm}$ .

### ABSTRACT

On September 8, 2023, at 22:11 UTC, an earthquake of magnitude 6.8 with epicenter near the village of Talat N'Yaaqoub, province of Al Haouz (Morocco), High Atlas region, shook violently the entire epicentral zone within a radius of more of 70km, seriously affecting the structures of more than 78,000 buildings and causing approximately 5,600 injuries and around 3,000 fatalities. This work presents part of the detailed source study of this earthquake, based on the interpretation of seismic and geodetic data, applying a crossing of methods. The results reveal a rupture beginning at a depth of 24km and evolving for around 10 s, on a sub-vertical fault plane oriented ENE-WSW with a dip towards NNW. The slips on the fault plane are mostly upward (reverse) but with a strike slip component in the WSW direction (left-lateral). The total seismic moment released by this source was  $M0=2.8\times10^{19}\text{Nm}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Sismo de Marrocos; Fonte sísmica; Inversão da forma de onda; Modelação da deformação Crustal; InSAR

## 1. INTRODUÇÃO

O sismo de MW=6.8 ocorrido no dia 8 de setembro de 2023 na região do Alto Atlas (Marrocos), foi o evento de maior impacto social e económico no país depois do grande terramoto de Agadir de 1960 (M5.7). A devastação produzida atingiu severamente uma vasta área, desde as pequenas povoações de montanha nas proximidades do epicentro até à grande cidade de Marraquexe, a cerca de 70km a NE do foco. Afetou severamente as infraestruturas de suporte a cerca de 2,8 milhões de pessoas e foi responsável por aproximadamente 3000 mortes. Segundo testemunhos recolhidos pelo Euro-Mediterranean Seismologic Centre (EMSC), para além do forte impacto no alto Atlas, foi sentido numa vasta região que se estendeu até à Argélia, Espanha e Portugal. É mais um caso de ocorrência sísmica de elevada intensidade em zona de baixa atividade sísmica, mas densamente povoada por uma população com recursos de mitigação limitados, a viver em edifícios sismicamente vulneráveis.

Como se pode constatar nos trabalhos publicados [1],[2],[3],[4],[5],[6] a sismicidade de Marrocos (Figura 1 - Dados do ISC (*International Seismological Centre* (2023), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>, para o período 1910 – 2023) é caracterizada por uma atividade baixa a moderada. Os mapas de sismicidade instrumental após 1900 mostram que, grosso modo, os epicentros se distribuem sobre duas faixas no território continental. A primeira, que contém a maior parte dos epicentros, distribui-se no norte do país, aproximadamente ao longo da costa do Mediterrâneo, em especial na zona da cintura do Rif. A sismicidade nesta faixa está associada à dinâmica do limite de placas Eurásia e Núbia e é caracterizada por sismos cuja magnitude raramente ultrapassa 5. Contudo são desta região os dois mais devastadores sismos anteriores ao de 8 de setembro de 2023, ocorridos nos últimos 20 anos: os de Al Hoceima de 1994 (Mw = 6.0) e de 2004 (Mw = 6.3). A segunda faixa de sismicidade alinha com a cadeia montanhosa do Atlas e orienta-se na direção NE-SW. É menos ativa que a primeira e está associada a uma complexa rede de falhas ativas, onde se destaca a falha do Atlas Sul, que começa na zona de Agadir. Os sismos nesta

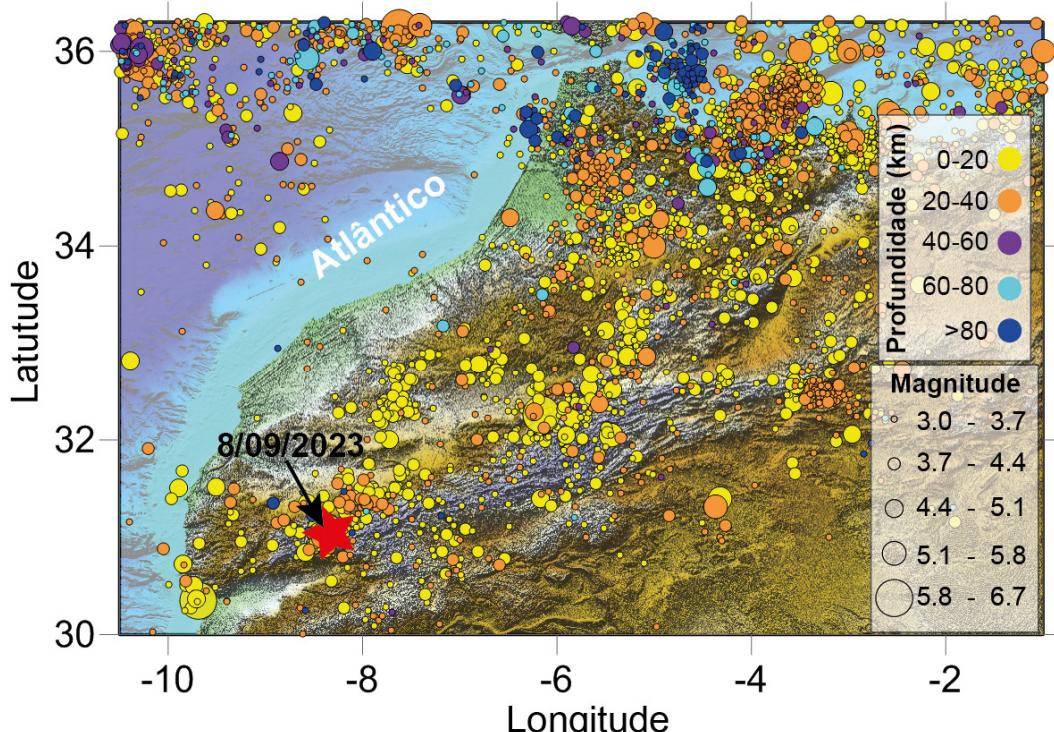


Fig. 1 – Sismicidade instrumental do norte de Marrocos de M>3.

faixa raramente atingem magnitudes superiores a 5, contudo foi nesta região que ocorreu o sismo de 8 de setembro de 2023 aqui analisado. Estudos sismotectónicos como [7] mostram que os sismos desta zona, tal como os da primeira faixa referida, estão igualmente associados ao regime de tensões do limite de placas Eurásia e Núbia, com eixos de pessão sub-horizontais NNW-SSE. A profundidade dos hipocentros da maioria dos sismos que ocorrem nas áreas sismogénicas de Marrocos raramente ultrapassam os 40 km. Constatata-se ainda que este padrão de sismicidade se correlaciona razoavelmente bem com o atual movimento da crusta, que se estima ser de cerca 4mm/ano na faixa do Rif e ~1mm/ano na região do alto Atlas [8],[9], [10].

Neste trabalho apresentaremos o plano de estudo da fonte do sismo de 8 de setembro feito a partir de dados sísmicos e geodésicos registados respetivamente em campo longínquo e próximo, analisados mediante o cruzamento de métodos e alguns resultados preliminares desse estudo. A geometria do plano de falha e hipocentro são estabelecidos a partir do tensor momento sísmico calculado por inversão da forma de onda segundo um modelo de fonte pontual.

Em contextos onde a libertação do momento sísmico acontece em geometrias espaço-temporais extensas e irregulares, e a largura espacial dos registos sísmicos permite detalhar pormenores da rotura, como é o caso do sismo aqui em análise, o modelo de fonte pontual limita a informação possível de obter para essas fontes. Os modelos que melhor se adequam nessas situações são os modelos de fonte extensa que combinam o efeito da evolução temporal da libertação de momento sísmico com o da propagação da rotura sobre a falha. Por esse motivo a evolução deste estudo preliminar será no sentido da inversão da forma de onda para o cálculo da distribuição espaço-temporal dos deslizamentos sobre o plano de falha, mediante um modelo de fonte extensa. O modelo de rotura assim obtido será aferido mediante a modelação da deformação cossísmica e sua comparação com a correspondente deformação obtida por Interferometria de radar de abertura sintética com dados do Sentinel-1

## 2. INFORMAÇÕES PRELIMINARES

A localização e magnitude do choque principal do sismo de 8 de setembro foram determinadas por várias agências nacionais de vigilância sísmica, que obtiveram valores ligeiramente diferentes como mostra a Tabela 1. Neste trabalho considerámos a localização publicada pelo *United States Geological Survey* (USGS) por ser uma localização revista e com a garantia de uma incerteza baixa tanto lateralmente como em profundidade (~3.1km).

Os dados macrossísmicos deste evento divulgados pelo USGS e EMSC, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/>, [https://emsc.eu/Earthquake\\_information/earthquake\\_map.php?id=1550978](https://emsc.eu/Earthquake_information/earthquake_map.php?id=1550978) ) revelam que foi registada uma intensidade máxima VIII junto ao epicentro, tendo sido observada uma elevação de superfície com cerca de 20 cm junto ao epicentro e cerca 7 cm de subsidência na parte sul.

Como seria de esperar após o choque principal verificou-se um aumento da atividade sísmica na região focal, numa sequência de choques secundários (réplicas) que tem estado a diminuir de frequência ao longo do tempo. Os dados de sismicidade na região

Tabela 1- Localização do foco do sismo de 8 de setembro de 2023 reportada por diversas agências.

Agência	Tempo de origem (UTC)	Latitude	Longitude	Profundidade (km)
IGN (Espanha)	22:11:00	31.2044	-8.7582	25.0
IPMA (Portugal)	22:11:02	31.078	-8.36	20.0
USGS (USA)	22:11:01	31.058	-8.385	19
INGV (Itália)	22:11:00	31.054	-8.3940	10
EMSC (França)	22:11:02	31.058	-8.490	26

IGN - Instituto Geográfico Nacional; (IPMA) Instituto Português do Mar e da Atmosfera; (USGS) United States Geological Survey; INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; EMSC - Euro-Mediterranean Seismologic Centre

obtidos nos catálogos do ISC (<http://www.isc.ac.uk>, acedido em 23/11/2023) e IPMA mostram que nos dois anos anteriores ao evento, a taxa de ocorrência de sismos de M>2 num raio de ~300km à volta da região epicentral deste sismo era cerca de 1.5/mês. No primeiro dia após o choque principal foram registados 37 eventos de M>2, verificando-se a partir daí um decréscimo do número de eventos segundo uma lei de potência do tipo  $N=1/(a+Ct)^\alpha$  (ver figura 2). Verifica-se ainda que as réplicas se distribuem num raio aproximado de 50km à volta do epicentro do choque principal. O mecanismo de fonte deste sismo foi determinado preliminarmente por várias agências cujas resultados se encontram na Tabela 2.

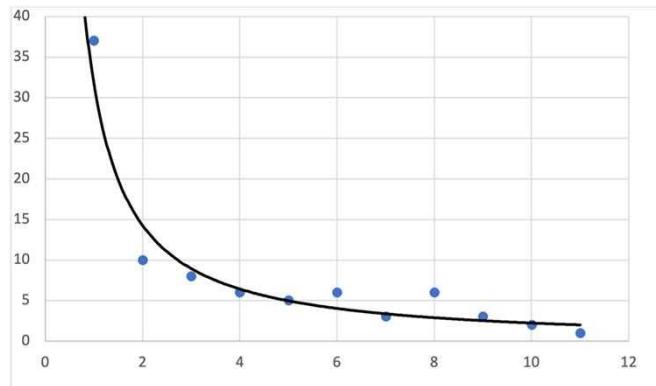


Fig. 2 – variação do número de réplicas de M>2 diárias nos primeiros 11 dias após o choque principal (dados ISC).

Tabela 2- Soluções do plano de falha do sismo de 8 de setembro de 2023, obtidos por inversão do tensor momento sísmico, por várias agências.

Agência	Lat.	Long.	H0 (km)	st1	Dp1	rk1	st2	Dp1	rk2	M0(N.m)
GCMT	31.0	-8.3	28	119	23	132	255	73	74	2.79E+19
GFZ	31.1	-8.4	27	118	21	124	262	73	78	2.60E+19
USGS	31.1	-8.4	31	122	29	132	255	69	69	2.34E+19
CPPT	31.1	-8.4	30	130	34	144	251	71	61	1.76E+19
IPGP	31.1	-8.4	24	136	37	143	257	69	59	3.25E+19
INGV	31.0	-8.3	23	130	30	136	259	70	68	2.30E+19

GCMT- Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project; GFZ - German Research Centre for Geosciences; USGS- United States Geological Survey; CPPT - Centre Polyndsiens de Prevention des Tsunamis; IPGP - Institut de Physique du Globe de Paris; INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Italia), **st1** e **st2** = Azimute dos planos de falha 1 e 2; **Dp1** e **Dp2** = Inclinação dos planos 1 e 2; **rk1** e **rk2** = Ângulo de deslizamento.

### 3. ESTUDO DA ROTURA POR INVERSÃO DA FORMA DE ONDA

A reconstituição da rotura sísmica consiste em caracterizar os deslizamentos ocorridos no interior da crusta que explicam as manifestações na superfície. Essa caracterização pode ser feita com maior ou menor detalhe dependendo dos dados e dos métodos disponíveis. Os métodos mais populares para resolver esta questão são os métodos de inversão da forma de onda. Porém, como na maioria dos problemas em Geofísica, as soluções destas inversões não garantem a unicidade. Para vencer esse obstáculo o que se costuma fazer é fixar o maior número de parâmetros do modelo, obtidos por outros métodos, e assim constringer as soluções possíveis.

Para o estudo desta fonte foi considerado um conjunto de registos sismológicos feitos em 26 estações de banda larga a distâncias telessísmicas, entre 30° e 90°, distribuídas em torno do epicentro (Figura 3). Desses registos foram selecionados 26 fragmentos de ondas P (componente vertical) e 8 componentes SH, convertidas para deslocamento do solo.

to

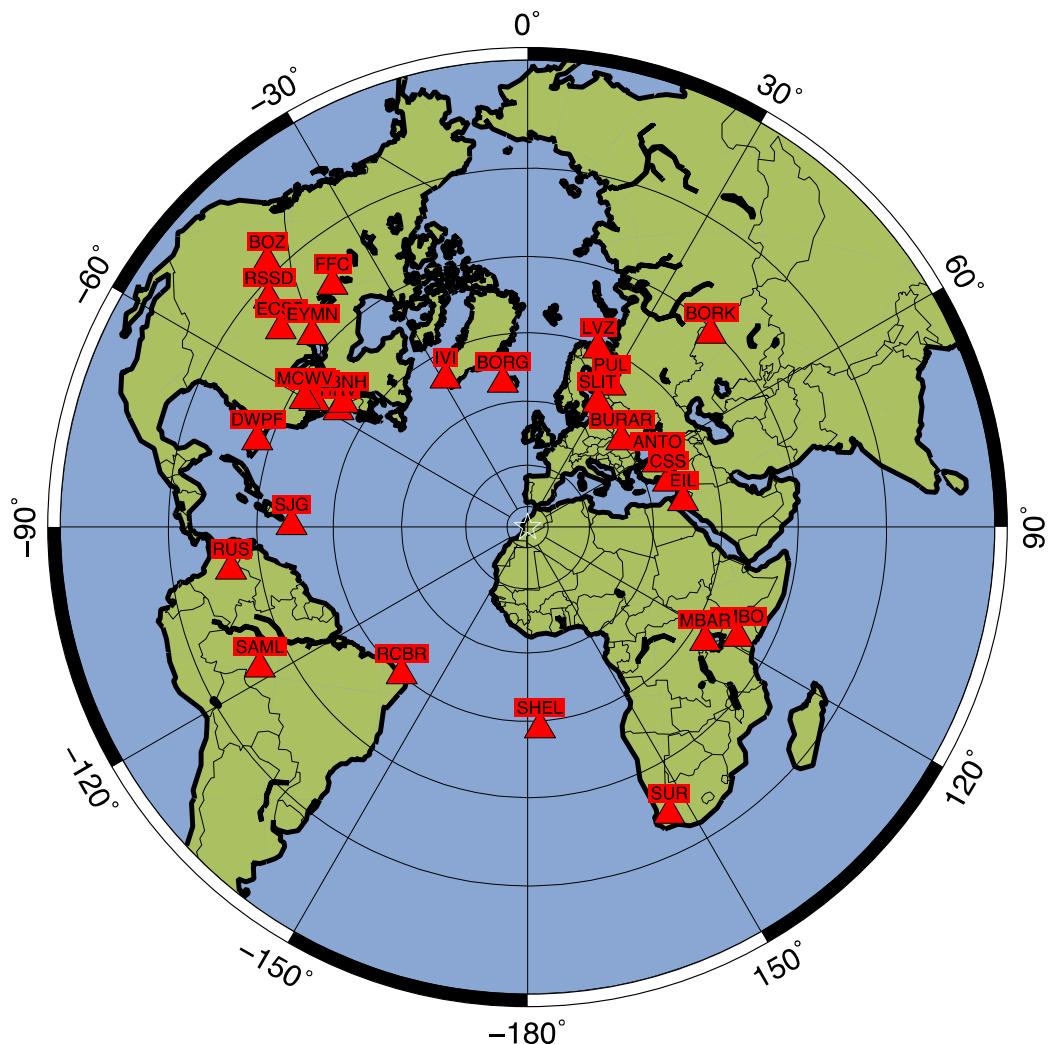


Fig. 3 – Localização das estações que registaram as formas de onda usadas neste trabalho.

Previamente à utilização dos dados referidos anteriormente para o estudo da fonte é necessário implementar uma cadeia de processamento de sinal. No caso concreto esse processamento foi feito utilizando maioritariamente o pacote SAC [11]. Consiste em

isolar o deslocamento o solo produzido pelas ondas P e SH, partindo dos registo sismológicos das estações e das respetivas respostas instrumentais (ambos obtidos no consórcio IRIS), e seguiu as seguintes etapas:

- 1-Picagem das fases P nas componentes verticais e fases S nas componentes horizontais;
- 2- Corte das formas de onda em menores porções de dados: entre 5 s antes das fases P e S e 80s após a chegada do P e S.
- 3- Decimação para uma taxa de amostragem de 5 Hz (delta=0,2s)
- 4-Correção do instrumento - desconvolução para deslocamento usando e filtragem simultânea com filtro passa banda entre 0.01 Hz e 0.6Hz.
- 5- Rotação das dos componentes S para obter os componentes R e T (usando a T como SH)
- 6- Ajuste do zero- deslocamento vertical das várias componentes de modo a amplitude do sinal no instante das chegadas P e SH ser zero.
- 7- Criação do ficheiro fort.1, que concentra todas as ondas processadas individualmente e respetivos metadados com informações paramétricas a utilizar na inversão.

O estudo completo desta fonte vai seguir uma metodologia que se desenvolve em duas etapas. Na primeira foi feita a inversão das formas de onda mediante um modelo de fonte pontual com mecanismo de duplo par de forças, fixando a profundidade do hipocentro. O resultado dessa inversão devolve as componentes do tensor momento sísmico e consequentemente a orientação de dois planos (um deles o da rotura e o outro o complementar) e o erro associado à solução. Repetindo o processo de inversão para várias profundidades e considerando a solução de menor erro, fixamos a profundidade e a orientação do plano de rotura e do seu complementar. Após esta etapa fica-se com uma ideia do mecanismo médio desta fonte. São determinados a profundidade do hipocentro, a orientação de dois planos em que um é o de rotura, e a direção e valor médio do deslizamento (slip). Porem persiste a dúvida de qual dos dois planos obtidos corresponderá ao plano de rotura. Para levantar essa dúvida há necessidade de recorrer a outras informações retiradas ou dos efeitos diretivos da rotura ou então à interpretação de perturbações geodésicas conhecidas.

A segunda etapa vai consistir numa nova inversão da forma de onda, mas agora mediante um modelo de fonte finita, para calcular a distribuição espaço-temporal de deslizamentos sobre o plano de falha. Para isso vamos aplicar o método de inversão desenvolvido por Kikuchi e Kanamori [12]. A geometria da falha é fixada usando os resultados da primeira etapa, sendo a dimensão ajustada por tentativa e erro.

Os métodos de inversão da forma de onda para a determinação dos parâmetros da fonte envolvem, no módulo direto, o cálculo das funções de Green a partir das quais são calculadas as formas de onda sintéticas que comparam com as observados. Para isso é necessário dispor dos modelos de velocidade das zonas atravessadas pelas ondas. Nos métodos utilizados é necessário considerar dois modelos. Um para a zona da fonte e outro para toda a estrutura interna da Terra e região da estação. Destes modelos o mais crítico é o da zona da fonte, que deve ser bem representativo da estrutura da zona da rotura. O outro modelo é menos crítico e pode usar-se um modelo global de velocidades. No caso concreto do sismo de Marrocos, para a zona da fonte foi usado um modelo de velocidades com 7 camadas, adaptado do modelo de estrutura da zona do Alto Atlas, considerando o ponto mais próximo do epicentro (LAT= 30.5 Long=-8), fornecido por Javier Fullea da Universidade Complutense de Madrid (comunicação pessoal). Para modelo de estrutura fi considerado o modelo global de Jeffreys-Bullen [13].

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Modelo de fonte pontual

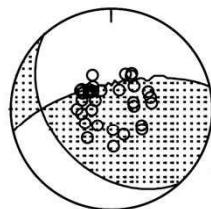
Foram realizadas inversões considerando uma duração de 20s para as ondas de volume, para uma faixa de profundidades entre 6 km e 34 km com intervalo de profundidade de 2 km. A solução que apresenta menor erro ocorreu quando o epicentro foi fixado a 24km de profundidade. A solução (Figuras 4 e 5) aponta para um mecanismo de falha inversa com uma componente de desligamento. A função temporal da fonte (FTF) indica que a rotura terá tido uma duração aproximada de 10s e um momento sísmico escalar de  $2.8 \times 10^{19}$  Nm, valor dentro da faixa de valores obtidos por outros autores (Tabela 1). Contudo, apesar deste resultado dar uma noção da dimensão e mecanismo da fonte não resolve a questão de discernir qual o plano de falha onde a rotura terá ocorrido. O método devolve dois planos que respondem exatamente da mesma forma aos dados utilizados, os planos (azimute, inclinação), A (139, 39) e B(257, 69). Um desses planos corresponde ao plano de falha onde a rotura ocorreu. A escolha de qual deles é feita com base na informação sobre a elevação do terreno a Norte do epicentro e a subsidência na parte sul ([https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Sentinel-1\\_reveals\\_shifts\\_from\\_Morocco\\_earthquake](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Sentinel-1_reveals_shifts_from_Morocco_earthquake)). Tal observação, e atendendo a que o movimento é de falha inversa, só é compatível com o movimento sobre o plano B, com o traço orientado no azimute 257º, com inclinação relativamente à horizontal de 69º com a pendente virada para Norte.

#### Marrocos 2023

Variância: 0.1713

H0=24km

#### Mecanismo



Str., Dip, Rake  
Plano A 139, 39, 146  
Plano B 257, 69, 56

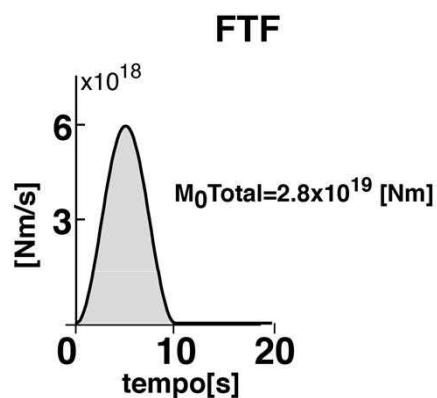


Fig. 4 – Modelo de rotura do sismo de Marrocos. Painel da esquerda - mecanismo médio com localização dos pontos de observação projetados na esfera focal; painel da direita - Função temporal da fonte que representa a taxa de liberação de momento sísmico durante a rotura.

## 5. TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Modelo de fonte finita

A etapa seguinte que estará concluída em breve consiste no cálculo da distribuição de deslizamentos por inversão da forma de onda, usando o algoritmo mom3 de [14]. A geometria do plano de falha (strike e dip) é fixada de acordo com o resultado da primeira etapa (257º e 69º). Sobre esse plano será fixada uma grelha com células quadradas de 4km de lado. Essa grelha é referenciada usando um referencial cartesiano com origem no ponto que coincide com o epicentro, neste caso à profundidade de 24km.

A inversão devolve a amplitude e a direção do deslizamento de cada uma das células que constituem a rede (sub-falhas) que cobre o plano de falha, em cada instante –

modelo de distribuição dos deslizamentos. A inversão fornece ainda a função de libertação temporal de momento sísmico, vulgarmente chamada função temporal da fonte. Para além do plano de rotura é necessário fixar a velocidade da frente de rotura sobre o plano de falha (velocidade de rotura). É um parâmetro que regula a evolução da rotura. Cada sub-falha só pode romper após a chegada da frente de rotura. No caso deste sismo vamos utilizar o valor de 2.7km/s que concorda com estudos teóricos eg. [15] que, nas condições consideradas, apontam para valores de 0.7 da velocidade das ondas S na região.

## 5.2. Validação do modelo de rotura

Os métodos de inversão da forma de onda sísmica utilizados permitiram a construção de um modelo pormenorizado de fonte para este sismo, que responde aos dados utilizados. Contudo, explicar os dados utilizados é a única garantia de qualidade que estes métodos podem oferecer. Porém, devido ao problema da não unicidade, essa garantia pode ser insuficiente. Uma das poucas formas de colmatar essa insuficiência é por o modelo à prova face a outro tipo de dados decorrentes da mesma fonte sísmica.

Calcular as deformações superficiais produzidas na região epicentral, usando o modelo de rotura obtido e confrontar esses valores com os correspondentes registadas por métodos geodésicos, configura uma boa confirmação.

A região de Al Haouz, palco do epicentro deste sismo, tem vindo a ser monitorizada pelos Radares de Abertura Sintética (SAR) a bordo do Satélite Sentinel-1. Do conjunto dos dados dessa monitorização há vários pares de imagens SAR (antes e depois do sismo) com quais é possível extraír, por processamento interferométrico de SAR (InSAR), informação da componente da deformação superficial ocorrida nesse intervalo de tempo na direção da visada do satélite.

Por outro lado, é possível, considerando o modelo de fonte estabelecido por inversão, calcular o campo de deformação cossísmica superficial, usando por exemplo o programa Coulomb [16][17]. Se esse campo de deformação calculado for projetado na direção da visada do satélite na posição de captura dos dados SAR usados e essa projeção for representada num diagrama de franjas como os interferogramas reais, obtém-se um interferograma sintético que pode ser comparado com o interferograma real. Dependendo do nível de similitude entre os dois interferogramas far-se-á a avaliação do modelo de rotura obtido pela metodologia apresentada, ou usando uma metodologia simples de comparação de imagens ou tentando uma inversão conjunta de dados sísmicos e geodésicos.

**Marrocos 2023**

Variância:

0.1713

— Observado  
— Sintético

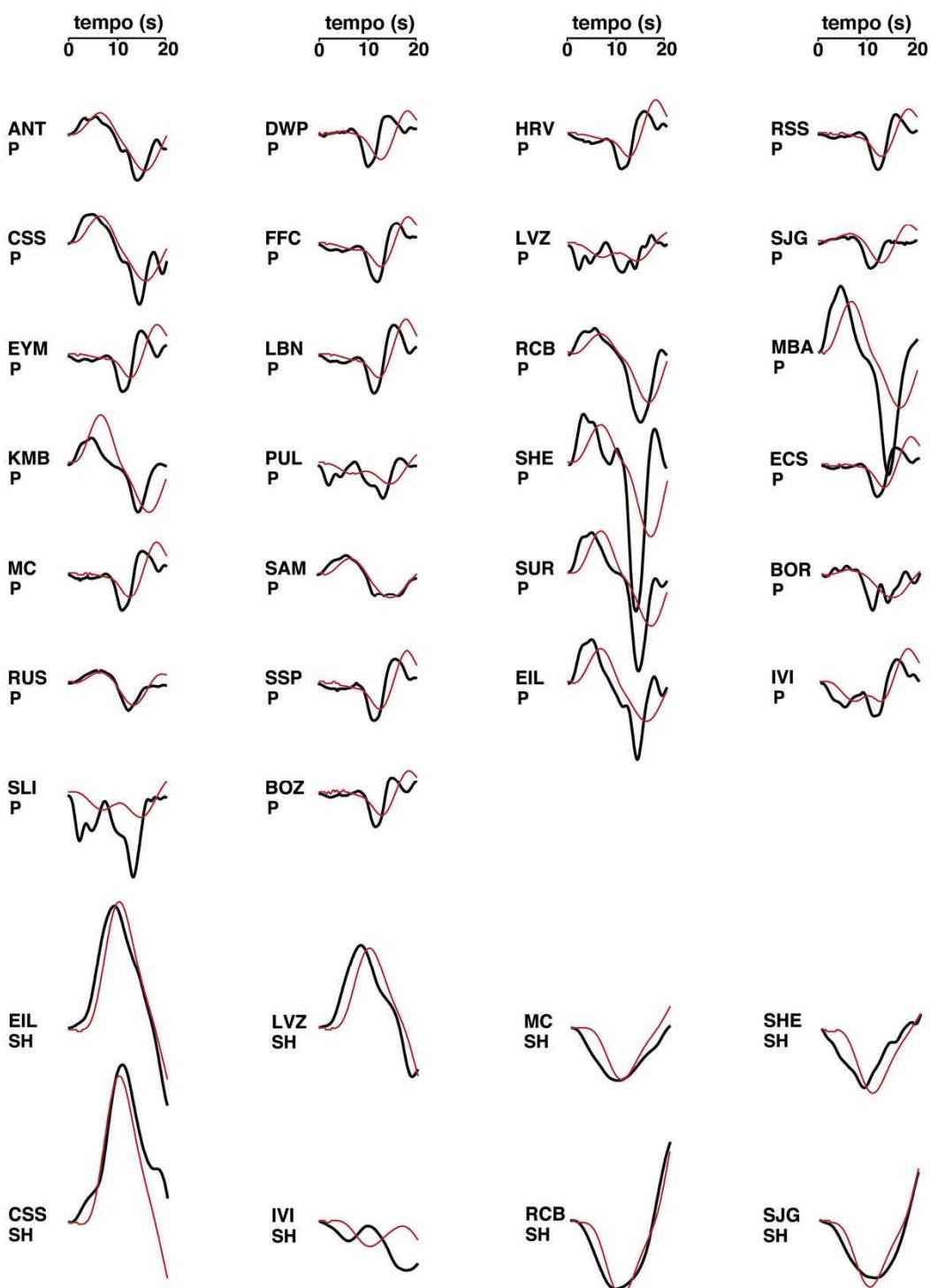


Fig.5 – Comparação entre as formas de onda observadas (preto) e as sintéticas (vermelho) explicadas pelo modelo de rotura obtido.

## 6. CONCLUSÕES

A partir do articulado dos métodos referidos será estabelecido um modelo pormenorizado da evolução cinemática da rotura do sismo de Marrocos de 2023 e feita a sua avaliação através de dados geodésicos. Contudo, com os resultados obtidos até ao momento por inversão da forma de onda mediante um modelo de fonte pontual, podemos já avançar que a rotura ocorreu sobre um segmento de um plano de falha sub-vertical (inclinado 69º relativamente à horizontal) orientado ENE-WSW (azimute=257º) com a pendente para NNW e teve início num ponto de nucleação (foco) à profundidade de 24km sob o epicentro. A função que dá a evolução da taxa de momento sísmico envolvido mostra que a rotura teve uma duração aproximada de 10 s e que durante esse tempo libertou um momento sísmico escalar total de  $2.8 \times 10^{19}$  Nm. Do mecanismo retiramos que os deslizamentos sobre o plano de falha, produzidos no processo de rotura, são maioritariamente ascendentes (inversos) mas com uma componente horizontal no sentido WSW (de desligamento esquerdo).

## 7. AGRADECIMENTOS

O trabalho foi apoiado pelo projeto UIDB/04683/2020 da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) - ICT (Instituto de Ciências da Terra). Agradecemos ao Prof. Javier Fullea da Universidade Complutense de Madrid pela cedência do modelo de velocidades da zona da fonte.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Bensaid, I., Cherkaoui, T.E., Medina, F., Caldeira, B., Buforn, E., Emran, A., and Hahou, Y. (2012) The 1992 Tafilalt seismic crisis (Anti-Atlas, Morocco). *Journal of seismology* 16, 35-53.
- [2] Cherkaoui, T.E. and El Hassani, A. (2012) Seismicity and Seismic hazard in Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre 34, 45-55.
- [3] Buforn, E., Pro, C., de Galdeano, C. S., Cantavella, J. V., Cesca, S., Caldeira, B., ... and Mattesini, M. (2017) The 2016 south Alboran earthquake (Mw= 6.4): A reactivation of the Ibero-Maghrebian region?. *Tectonophysics* 712, 704-715.
- [4] Cherkaoui, T. E., and El Hassani, A. (2023) *Les séismes au Maroc*, Hassan II Academy Press, Rabat.
- [5] Buforn E. and Udiás A. (2010) Azores-Tunisia, a tectonically complex boundary. In: Dmowska R. (ed) *Adv Geophys* 52, 139–182
- [6] Hatzfeld D. and Frogneux M (1981) Intermediate depth seismicity in the western Mediterranean unrelated to subduction of oceanic lithosphere. *Nature* 292, 443–445
- [7] Moudnib, L. E., Timoulali, Y., Nouayti, A., El Abbassi, M., Bouka, M., Nouayti, N., and Mhammdi, N. (2023) Seismotectonic model of High-Middle Atlas Junction (Morocco) derived from earthquake focal mechanism and stress tensor analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2407-2423.
- [8] DeMets C., Gordon R.G. and Argus D.F. (2010) Geologically current plate motions. *Geophys J Intern* 181, 1–80
- [9] Buforn E., Sanz de Galdeano C. and Udiás A. (1995) Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region. *Tectonophysics* 152, 89–118
- [10] Buforn E., Bezzeghoud M., Udiás A., and Pro C. (2004) Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications. *Pure Appl Geophys* 161(3), 623–646
- [11] Goldstein, P. and Snook, A. (2005) SAC Availability for the IRIS Community, Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter.
- [12] Kikuchi, A. and Kanamori, H., (1991) Inversion of complex waves III. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 2335–2350.

- [13] Jeffreys H. and Bullen K.E. (1940) Seismological Tables, British Association for the Advancement of Science, London.
- [14] Kikuchi, M. and Kanamori, H. (2003) Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI> .
- [15] Hussain, M. A., Rajaramb, C., and Kumar, R. P. (2005) Study on the correlation between shear and rupture wave velocity of Chandigarh fault, Joint International Workshop of ISPRS WG VIII/1 and WG IV/4 on Geospatial Data for Disaster and Risk Reduction.
- [16] Toda S., Stein R.S., Richards-Dinger K. and Bozkurt S. (2005) Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *J Geophys Res*, 110(B5)
- [17] Lin J. and Stein R.S. (2004) Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *J Geophys Res* 109(B2)