

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e
Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Fisica

La sorgente sismica estesa: simulazioni e misure su una faglia di Haskell

Relatori:

Dott. Guido Russo
Dott. Simona Colombelli

Candidato:

Lorenza Di Mauro
Matricola N85001432

A.A. 2020/2021

Indice

Introduzione.....	4
CAPITOLO 1	
La sorgente sismica estesa: il modello di Haskell	5
1.1. Nozioni preliminari.....	5
1.2. La sorgente estesa	7
1.2.1. I parametri di sorgente	9
1.3. Il modello di Haskell	10
1.3.1. Rappresentazione nel dominio del tempo	11
1.3.2. Rappresentazione nel dominio della frequenza	13
1.3.3. Effetto di direttività della rottura	14
CAPITOLO 2	
Simulazioni di faglie rettangolari	18
2.1. Descrizione della procedura	18
2.2. Verifica del codice	20
2.3. Misure di pendenza.....	21
2.3.1. Misure e ricerca del massimo.....	21
2.3.2. Infittimento delle misure	23
2.3.2. Calcolo della pendenza e analisi dei risultati	24
Conclusioni.....	26
Bibliografia.....	27

Introduzione

In questo lavoro di tesi si analizzano, attraverso simulazioni numeriche del modello di faglia estesa di Haskell, i primi secondi del segnale associato alle onde P. Negli ultimi anni, la comunità sismologica ha vissuto un dibattito sulla possibilità di poter stimare rapidamente la magnitudo dei terremoti a partire dalle caratteristiche iniziali dei sismogrammi osservati. In particolare, recenti lavori si sono concentrati sulla misura della pendenza iniziale associata al segnale, in determinate condizioni di registrazione, supportando l'idea che questa potesse essere rappresentativa della magnitudo finale dei terremoti. La stima rapida di questa pendenza potrebbe quindi consentire di discriminare terremoti potenzialmente distruttivi ed intervenire tempestivamente, attraverso strategie in tempo reale, per ridurre i danni. L'obiettivo di questa tesi è di simulare i sismogrammi registrati durante dei terremoti di magnitudo variabile, stimare la pendenza dei segnali iniziali e comprendere le principali sorgenti di variabilità di questo parametro.

Nel *capitolo 1* viene descritto il modello adoperato e vengono forniti alcuni fondamenti di teoria della sorgente sismica necessari a comprendere il processo del fenomeno di rottura che rilascia energia sotto forma di onde sismiche.

Nel *capitolo 2* vengono brevemente descritte le relazioni adoperate e la procedura seguita nelle simulazioni. In una prima parte, viene mostrata la coerenza del codice utilizzato con la teoria. Infine è mostrata l'analisi delle misure di pendenza effettuata su delle simulazioni di terremoti.

CAPITOLO 1

La sorgente sismica estesa: il modello di Haskell

1.1. Nozioni preliminari

Un terremoto si origina quando gli sforzi di natura tettonica agenti all'interno della crosta superano la resistenza delle rocce generando una frattura. Tale processo si sviluppa lungo una superficie, detta faglia, che separa idealmente due masse rocciose che dislocano, spostandosi reciprocamente (*Figura 1*).

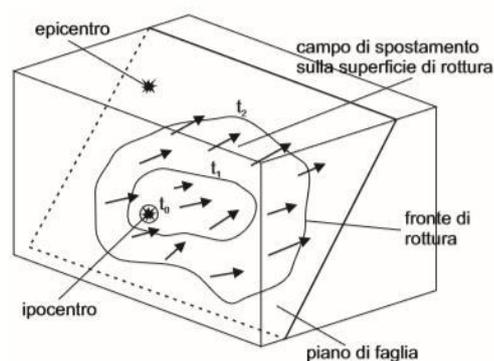


Figura 1. Rappresentazione schematica della frattura. Le isolinee costituiscono l'evoluzione spaziale del fronte di rottura mentre le frecce indicano la direzione media della dislocazione.

A partire dal punto in cui si enuclea la frattura, detto ipocentro, la dislocazione si propaga sulla faglia generando un *fronte di rottura*, le cui caratteristiche geometriche e cinematiche dipendono dalle proprietà dello sforzo agente e della resistenza delle rocce interessate nella frattura. Al propagarsi del fronte di rottura, una parte dell'energia rilasciata dal terremoto si trasforma in calore per l'attrito generato lungo il piano di faglia, mentre un'altra viene irradiata sotto forma di onde sismiche.

Indicando con Σ^+ e Σ^- i due lati della superficie di faglia (*Figura 2*) è possibile descrivere il processo di dislocazione associato ad una frattura sismica mediante una funzione sorgente:

$$\Delta \mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}, t) = \Delta \mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}, t)|^{\Sigma^+} - \Delta \mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}, t)|^{\Sigma^-} \quad (1.1)$$

che rappresenta lo spostamento relativo dei punti su Σ^+ rispetto ai corrispondenti su Σ^- , in funzione dello spazio e del tempo.

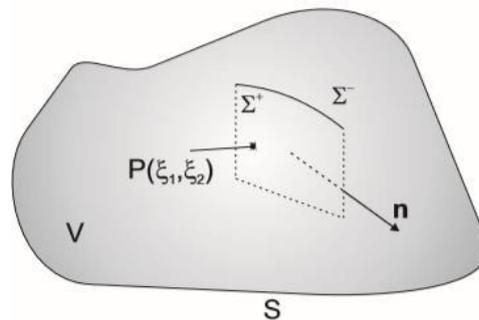


Figura 2. Rappresentazione di una faglia all'interno di un volume V con superficie esterna S.

La determinazione della funzione sorgente è uno dei principali obiettivi delle analisi sismologiche, in quanto essa caratterizza completamente l'evoluzione spazio-temporale del processo di frattura che origina i terremoti.

Il processo di frattura reale alla sorgente è piuttosto complesso: l'evoluzione temporale della dislocazione può essere molto irregolare, il vettore spostamento associato ad ogni elemento di faglia può cambiare direzione e ampiezza da punto a punto. Tuttavia, adottando una descrizione semplificata, il processo di frattura può essere approssimato da un'unica funzione dislocazione $\langle \Delta \mathbf{u}(t) \rangle$ mediata su tutti i punti della faglia e poi associata ad un singolo punto, che rappresenta il centroide della superficie di faglia.

Questa approssimazione vale solo quando le lunghezze d'onda delle onde sismiche emesse sono molto maggiori della dimensione della sorgente, e sono registrate a grande distanza da essa (condizione di campo lontano o *far-field*). In questo caso, i contributi emessi da ogni elemento di faglia risulteranno indistinguibili all'osservatore e saranno riconducibili ad un unico punto della superficie di faglia.

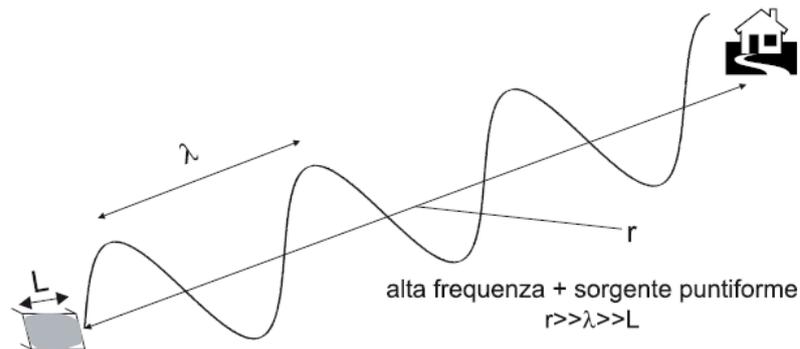


Figura 3. Intervalli di distanze e lunghezza d'onda per l'approssimazione di sorgente puntiforme: λ rappresenta la lunghezza d'onda osservata, L la massima dimensione lineare della sorgente ed r la distanza fra sorgente e ricevitore. Come si può osservare la dimensione lineare è molto inferiore alla lunghezza d'onda che a sua volta è molto inferiore della distanza.

1.2. La sorgente estesa

L'approssimazione di sorgente puntiforme nell'analisi sismica è applicabile soltanto in determinati intervalli di lunghezze d'onda. Quando esse sono comparabili con le dimensioni lineari dell'area della rottura prodotta dal terremoto, bisogna tenere conto dell'estensione della sorgente.

In realtà, in analogia con la sorgente puntiforme, è possibile descrivere anche le sorgenti estese con l'approssimazione di *far-field* mediante il *teorema di rappresentazione*, che consente di descrivere una sorgente estesa come somma di un certo numero di contributi elementari (puntiformi) che la compongono (Zollo e Emolo, 2011).

In generale la radiazione sismica generata da una sorgente estesa può essere rappresentata tramite la convoluzione di una funzione sorgente (che, come detto, rappresenta la dislocazione dei punti della faglia) con una funzione di Green che rappresenta la propagazione attraverso il mezzo circostante. Se tutti i punti della faglia sono osservati in *far-field*, si può dimostrare (Zollo e Emolo 2011) che il sismogramma u^c in una generica posizione \mathbf{r} e ad un generico istante di tempo t è dato da:

$$u^c(\mathbf{r}, t) = \iint_{\Sigma} G_c^{FF}[\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}, t, t_R(\boldsymbol{\xi})] * \Delta\dot{u}[\boldsymbol{\xi}, t - t_R(\boldsymbol{\xi}) - t_c(\boldsymbol{\xi}, \mathbf{r})] d\Sigma \quad (1.2)$$

dove Σ è la superficie della faglia, G_c^{FF} è la funzione di Green in approssimazione di *far-field*, Δu è la funzione sorgente, $\boldsymbol{\xi}$ è la posizione dell'elemento di sorgente, t_R è il tempo a cui avviene la rottura dell'elemento di faglia, t_c è il tempo di propagazione dell'onda sismica dall'elemento di sorgente al ricevitore e $\Delta\dot{u}$ rappresenta la velocità di dislocazione.

La (1. 2) permette di considerare la radiazione sismica emessa dalla sorgente come la sovrapposizione nel tempo di segnali emessi dai singoli elementi di faglia durante il processo di rottura. Infatti, ciascuno degli elementi disloca (quindi irradia onde) solo nel momento in cui è raggiunto dal fronte di rottura, pertanto la somma dei singoli contributi fornisce il sismogramma associato alla faglia estesa (*Figura 4*).

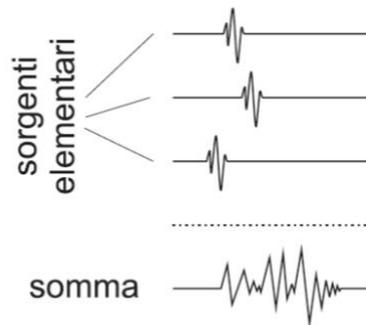


Figura 4. Radiazione sismica come sovrapposizione temporale di segnali generati da una distribuzione di sorgenti elementari.

1.2.1. I parametri di sorgente

La caratterizzazione completa della sorgente sismica è piuttosto complessa. Nella pratica, per la descrizione dei processi di frattura sismica, si adottano geometrie e modelli semplificati, basati su un numero limitato di parametri che sintetizzano il processo frattura dal punto di vista cinematico. Una sorgente sismica è quindi caratterizzata da:

- Geometria della faglia: in un modello di faglia rettangolare si considera una superficie caratterizzata da lunghezza L e larghezza W , con una certa orientazione nello spazio definita mediante tre angoli (*Figura 5*):
 - Strike (ϕ) è l'azimut di una linea creata dall'intersezione del piano della faglia e una superficie orizzontale, va da 0° a 360° rispetto al Nord;
 - Dip (δ) è l'angolo tra la faglia e un piano orizzontale va da 0° a 90° ;
 - Slip (λ) definisce la direzione dello spostamento lungo il piano della faglia va da -180° a 180° .

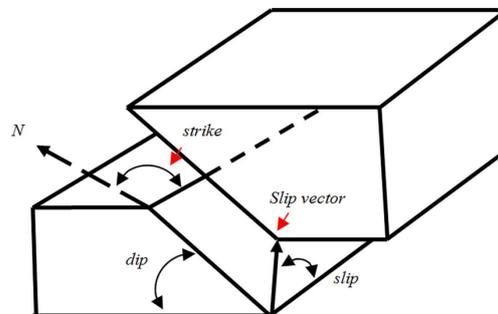


Figura 5. Orientazione nello spazio di una faglia.

- Velocità di rottura v_R : tipicamente la frattura si genera in una zona molto piccola della faglia ed evolve con fronti di rottura irregolari dovuti ad una distribuzione eterogenea della velocità di rottura. Se v_R è uniforme i fronti di rottura saranno, in generale, circonferenze concentriche. La velocità di rottura varia da terremoto a terremoto, ma viene stimata non eccedere mai il 90 per cento della velocità delle onde S nel mezzo.

- Funzione sorgente $\Delta u(t)$: descrive come dislocano i punti sulla superficie della faglia una volta raggiunti dal fronte di rottura; la forma di tale funzione viene assunta nota a priori (*Figura 6*).
- Tempo di salita (*rise time*) τ_r : indica la durata del processo di dislocazione del singolo punto, si conta a partire dall'istante in cui il punto in esame viene investito dal fronte di rottura fino al raggiungimento del valore di dislocazione massimo (*Figura 6*).
- Dislocazione finale D_0 : rappresenta il valore finale di spostamento dei singoli punti della superficie di frattura quando il processo di dislocazione è terminato (*Figura 6*).

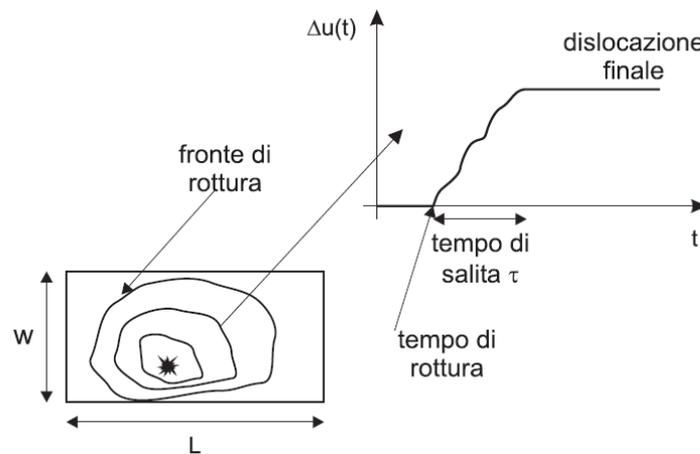


Figura 6. Modello cinematico di frattura per una sorgente estesa rettangolare.

1.3. Il modello di Haskell

Il modello di Haskell si basa sull'assunzione di una superficie rettangolare di frattura, caratterizzata da $L \gg W$ (sorgente linea). La rottura inizia in corrispondenza di un bordo e si propaga in maniera unilaterale con velocità costante v_R secondo fronti d'onda rettilinei ortogonali ad L . Il tempo di risalita e la dislocazione finale sono considerati costanti per tutti i punti appartenenti alla faglia.

La funzione sorgente (Figura 7) è una rampa lineare del tipo:

$$\begin{cases} 0 & \text{per } t < t_R \\ \frac{D_0}{\tau}(t - t_R) & \text{per } t_R < t < t_R + \tau_r \\ D_0 & \text{per } t > t_R + \tau_r \end{cases}$$

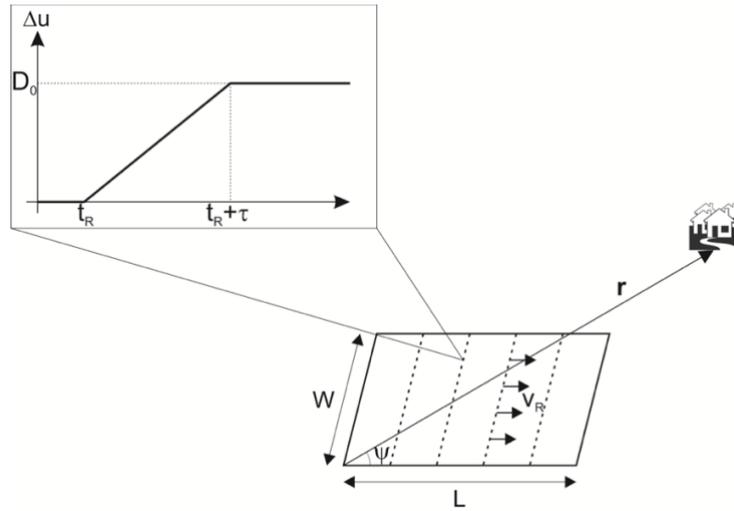


Figura 7. Geometria e parametri di sorgente nel modello di Haskell.

1.3.1. Rappresentazione nel dominio del tempo

Per determinare lo spostamento associato al modello di Haskell si adopera il principio di sovrapposizione: il sismogramma osservato è la somma di sismogrammi dovuti a tanti segmenti infinitesimi di lunghezza Δx che compongono la superficie totale di rottura.

Per quanto detto, lo spostamento totale sarà

$$u(\mathbf{r}, t) = \sum_i u_i\left(\mathbf{r}_i, t - \frac{r_i}{c} - \Delta t_i\right) \quad (1.3)$$

dove $\Delta t_i = x_i/v_R$ rappresenta il ritardo di attivazione delle sorgenti elementari successive.

Esprimendo u_i nell'ipotesi di un mezzo di propagazione omogeneo e isotropo e di sorgente puntiforme si ricava

$$u(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi\rho c^3} WR^c \sum_i \Delta\dot{u} \left(t - \frac{x_i}{v_R} \right) \Delta x \quad (1.4)$$

Utilizzando le proprietà della delta di Dirac e passando al limite per $\Delta x \rightarrow 0$ si ottiene:

$$u(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi\rho c^3} WR^c \Delta\dot{u}(t) * B(t; \tau_c) \quad (1.5)$$

dove $B(t; \tau_c)$ indica la funzione *box* di durata $\tau_c = L/v_R$.

Poiché la funzione sorgente nel modello di Haskell è rappresentata da una rampa lineare, la sua derivata rispetto al tempo sarà una funzione *box* di durata τ_r (Figura 8).

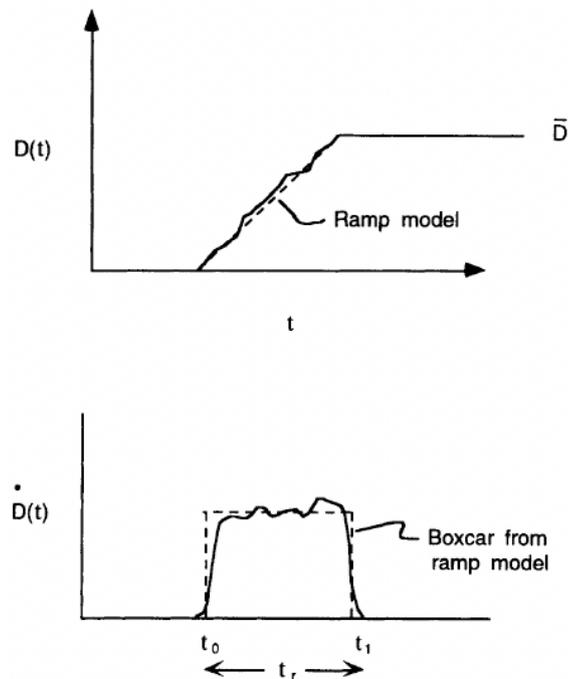


Figura 8. Funzione sorgente del modello di Haskell e rispettiva derivata.

Si ottiene dunque

$$u(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi\rho c^3} WR^c B(t, \tau_r) * B(t; \tau_c) \quad (1.6)$$

ossia lo spostamento *far field* per una sorgente di Haskell è proporzionale alla convoluzione di due funzioni box la prima delle quali è la derivata temporale della funzione sorgente e la seconda è legata all'estensione finita della faglia.

Il sismogramma in spostamento associato alla sorgente è, pertanto, una funzione trapezoidale avente durata uguale alla somma delle due funzioni convolute e tempi di salita e discesa pari alla durata della funzione box più breve (Zollo e Emolo 2011) (*Figura 9*).

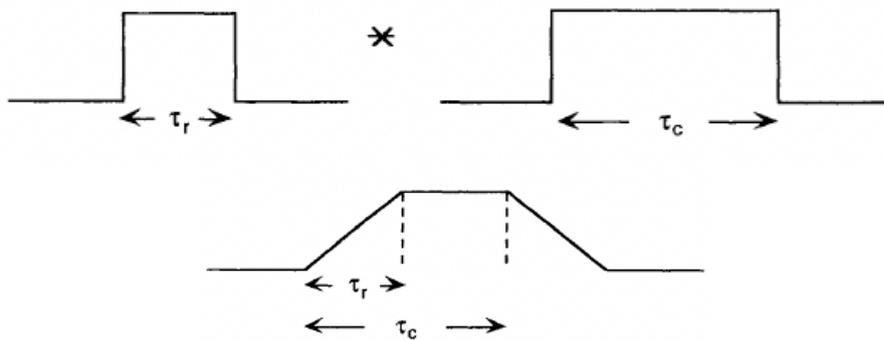


Figura 9. Convoluzione di due funzioni box.

1.3.2. Rappresentazione nel dominio della frequenza

La rappresentazione nel dominio del tempo è complementare a quella nel dominio della frequenza per l'osservazione del segnale. Inoltre, nel dominio della frequenza, la convoluzione tra le due funzioni box si traduce in un prodotto il che risulta numericamente più vantaggioso¹.

¹ Nel codice adoperato in questa tesi per le simulazioni viene effettivamente calcolato lo spettro del sismogramma e poi applicata una FFT inversa.

Si può mostrare (Zollo e Emolo 2011) che lo spettro di spostamento per la fase sismica che si propaga con velocità c ad un ricevitore posto nella posizione \mathbf{r} è dato da

$$\tilde{u}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{\mu R^c}{4\pi\rho c^3} WLD_0 \frac{\sin X}{X} \frac{e^{-i\omega\tau_r} - 1}{\omega\tau_r} \exp\left[-i\left(\omega\frac{r}{c} + X - \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (1.7)$$

dove

$$X = \frac{\omega L}{2} \left(\frac{1}{v_R} - \frac{\cos\psi}{c} \right) \quad (1.8)$$

con ψ angolo tra la direzione di propagazione della rottura e il vettore r .

1.3.3. Effetto di direttività della rottura

Nel modello di Haskell la funzione box associata alla propagazione della rottura ha durata $\tau_c = L/v_R$ come osservato nel caso di *far-field* e di una stazione situata nella direzione perpendicolare alla faglia. Tale durata dipende, quindi, sia dalle dimensioni della faglia che dalla velocità di rottura. Tuttavia, più in generale, la durata dipenderà dalla posizione azimutale della stazione rispetto alla sorgente (*Figura 10*).

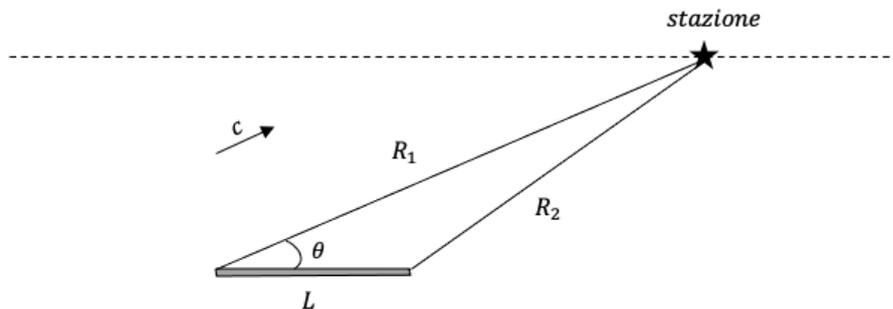


Figura 10. Geometria adoperata per il calcolo della durata del sismogramma.

Se si indica con T_1 l'istante di arrivo della fase di enucleazione della rottura al ricevitore e con T_2 quello della fase di arresto, la durata sarà $\tau_c = T_2 - T_1$.

Detta c la velocità di propagazione delle onde sismiche, si avrà

$$T_1 = \frac{R_1}{c}$$

$$T_2 = \frac{L}{v_R} + \frac{R_2}{c}$$

$$\rightarrow \tau_c = T_2 - T_1 \approx \frac{L}{v_R} + \frac{R_1 - L \cos \theta}{c} - \frac{R_1}{c}$$

$$\rightarrow \tau_c = \frac{L}{v_R} \left(1 - \frac{v_R}{c} \cos \theta \right)$$

(1.9)

Si osservi come per $\theta = \pi/2$ si ritrova effettivamente il valore $\tau_c = L/v_R$. Si possono, inoltre, considerare i due casi estremi: $\theta = 0$ (la rottura procede verso il ricevitore) e $\theta = \pi$ (la rottura si allontana dal ricevitore).

$$\tau_c |_{\theta=0} = \frac{L}{v_R} \left(1 - \frac{v_R}{c} \right)$$

$$\tau_c |_{\theta=\pi} = \frac{L}{v_R} \left(1 + \frac{v_R}{c} \right)$$

(1.10)

Nel primo caso, la durata del sismogramma ha il minimo valore possibile che corrisponde un elevato contenuto in alta frequenza. Nel secondo caso, la durata ha il massimo valore possibile il che corrisponde ad un basso contenuto in alta frequenza.

L'effetto di variazione della durata del segnale in funzione di θ è detto *direttività della rottura*. L'effetto di direttività di rottura produce una variazione dell'ampiezza e della frequenza del segnale emesso in funzione dell'azimut di osservazione (simile all'effetto Doppler acustico).

Qualunque sia il modello adottato per la descrizione della sorgente sismica, l'area sottesa dalla funzione sorgente non dipende dal punto di osservazione. Essa rappresenta una costante del processo in quanto legata al parametro momento sismico che rappresenta, da un punto di vista fisico, il momento M_0 della forza responsabile della dislocazione in profondità (*Figura 11*). Poiché l'area è costante insieme al rise time, ma l'ampiezza dei segnali osservati è variabile, questo si traduce in una differente pendenza (rapporto tra ampiezza dell'onda e *rise time*) del tratto iniziale, osservata sulle forme d'onda.

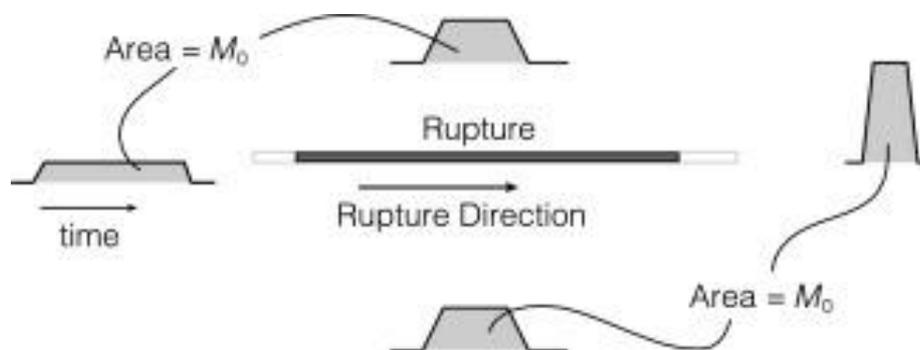


Figura 11. Variazione azimutale della funzione del tempo sorgente per una faglia a rottura unilaterale. La durata cambia, ma l'area della funzione tempo sorgente è costante (indipendente dall'azimut) e uguale al momento sismico.

Dalla (1. 9) emerge come τ_c dipenda, in generale, dal rapporto tra la velocità di rottura e la velocità delle onde, quindi il diagramma di radiazione per due diversi rapporti di velocità cambia in modo significativo, specialmente per le onde S (Figura 12).

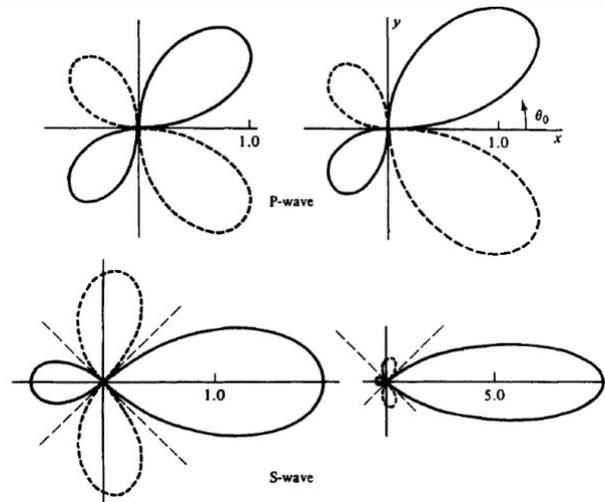


Figura 12. Variabilità dell'ampiezza onde P e onde S, a sinistra il rapporto $v_r/v_s = 0.5$ mentre a destra è pari a $v_r/v_s = 0.9$. Si noti che l'effetto viene notevolmente amplificato quando la velocità di rottura si avvicina a quella di propagazione.

CAPITOLO 2

Simulazioni di faglie rettangolari

2.1. Descrizione della procedura

Il modello di Haskell prevede una sorgente estesa di forma rettangolare sulla cui superficie vengono supposti costanti la velocità di rottura e il *rise time*. Man mano che il fronte di rottura si estende, le regioni interessate della faglia dislocano e irradiano energia sotto forma di onde P e onde S.

Il grafico della registrazione del moto del suolo nel tempo effettuata tramite i sismometri prende il nome di *sismogramma*. In particolare, i sensori posti nelle stazioni registrano le tre componenti del moto del suolo secondo le direzioni di un sistema cartesiano: componente verticale, componente Nord-Sud e componente Est-Ovest.

In questo lavoro di tesi sono state effettuate simulazioni di faglie di Haskell attraverso un programma *Fortran*. Le grandezze in input sono legate ai parametri geometrici della faglia (lunghezza, orientazione), alla dinamica della rottura e alle caratteristiche del mezzo di propagazione (τ_r, v_p, v_s, v_r).

L'output è costituito dalle tre componenti del moto del suolo e può essere visualizzato attraverso il software *SAC* (*Seismic Analysis Code*) con cui è possibile, inoltre, misurare le quantità di interesse.

In particolare, per tre diverse magnitudo (5.8, 6.5, 7) sono stati simulati dati per due diversi valori del dip della faglia ($\delta = 60^\circ, \delta = 90^\circ$) e due diverse velocità di rottura ($v_r = 2.5 \text{ km/s}, v_r = 3 \text{ km/s}$); le simulazioni sono state effettuate a diversi angoli (azimut) lungo delle semicirconferenze, la cui distanza dalla faglia è stata scelta in modo da far valere sempre l'approssimazione di campo lontano.

Nella scelta dei parametri di faglia sono state utilizzate diverse relazioni.

- Fissata la magnitudo del terremoto, è possibile ricavare la lunghezza della faglia attraverso la relazione (Wells e Coppersmith 1994):

$$M_w = a + b \log L \quad (2.1)$$

dove $a = 4.33$ e $b = 1.49$, L è in chilometri e M_w è la magnitudo momento.

- A partire dalla magnitudo è possibile anche calcolare il momento sismico M_0 con la relazione (Hanks e Kanamori 1979):

$$\log M_0 = 1,5 M_w + 9.1 \quad (2.2)$$

dove M_0 è espresso in $N \cdot m$.

- Attraverso il momento sismico si può, infine, ottenere il rise time mediante la seguente relazione (Melgar e Hayes 2017):

$$\log \tau_r = -5.323 + 0.293 \log M_0 \quad (2.3)$$

La prima fase di simulazione è stata incentrata sulla verifica del corretto funzionamento del codice attraverso il confronto dei risultati delle simulazioni con le relazioni teoriche viste nel precedente capitolo. La seconda fase, invece, si è basata su misure di ampiezza al variare dell'azimut al fine di ricavare relazioni tra la pendenza (intesa come rapporto tra ampiezza e rise time), magnitudo e velocità di rottura.

2.2. Verifica del codice

In questa fase sono state effettuate sei prove volte a verificare che il *rise time* non dipendesse dall'azimut. Inoltre è stata misurata la base dei trapezi risultanti dalla convoluzione delle funzioni box. Come noto dalla teoria, essa è legata alla durata τ_c . Per effetto della direttività ci si aspetta che τ_c sia minimo in posizione direttiva, quindi per un azimut di 0° , e massimo in posizione anti-direttiva cioè a 180° . Inoltre il suo valore a 90° dipende esclusivamente dalla lunghezza della faglia dalla velocità di rottura: parametri noti a priori in quanto inseriti in input al programma.

Le simulazioni svolte confermano quanto atteso dalla teoria con un andamento di *durata-angolo* come in *Figura 13*.

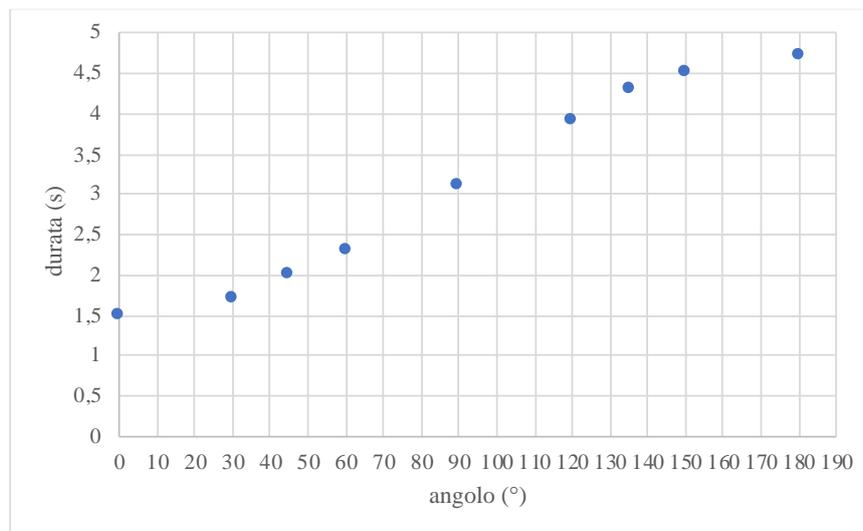


Figura 13. Grafico durata-angolo nel caso di magnitudo 5.8 con una faglia rettangolare avente $\text{dip}=60^\circ$ e velocità di rottura pari a 2.5 km/s. Gli altri casi presentano andamenti pressoché simili ma tempi differenti.

2.3. Misure di pendenza

Questa fase del lavoro si è incentrata sulla ricerca di relazioni tra *rise time* e ampiezza del trapezio. Per poter capire la variabilità della pendenza iniziale associata all'effetto di direttività, è necessario però eliminare l'effetto del *radiation pattern*, che a sua volta produce variazioni di ampiezza osservata. A tale scopo, si individuano gli angoli corrispondenti ai punti di massimo del diagramma di radiazione della fase scelta (fase P), e si concentra la misura in un intorno ragionevolmente piccolo di questo angolo. In tale maniera, l'effetto del diagramma di radiazione sulle ampiezze osservate è minimizzato. Il lavoro si è quindi articolato nelle seguenti fasi:

1. misure di ampiezza lungo la circonferenza e ricerca dei punti di massimo del diagramma di radiazione per le onde P;
2. infittimento delle misure in corrispondenza dei picchi trovati;
3. calcolo delle pendenze dei lati obliqui dei trapezi (rapporto tra ampiezza e tempo) e analisi dei risultati ottenuti.

2.3.1. Misure e ricerca del massimo

In questa fase sono state effettuate sei diverse prove al variare della magnitudo e della velocità (*Tabella 1*)

PROVE	M _w	v _r (km/s)	t _r (s)	L (km)	W (km)	R (km)
1	5.8	2.5	0.8	9.7	1	100
2	5.8	3	0.8	9.7	1	100
3	6.5	2.5	1.6	28.6	3	200
4	6.5	3	1.6	28.6	3	200
5	7	2.5	2.6	61.9	6	300
6	7	3	2.6	61.9	6	300

Tabella 1. Descrizione delle simulazioni effettuate.

Per ogni prova sono state raccolte le misure delle onde P in nove diverse stazioni situate lungo semicirconferenze (*Figura 14*).

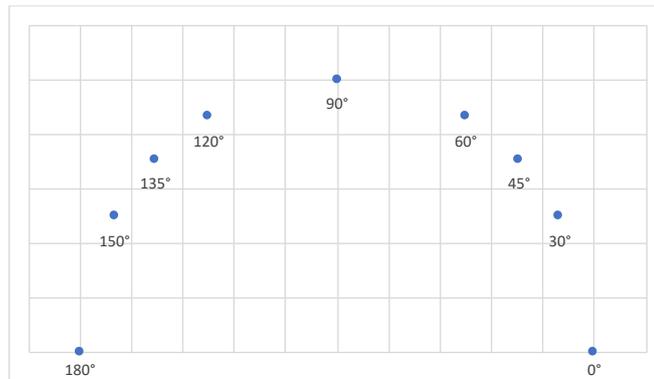


Figura 14. Schema delle stazioni situate a diversi azimut.

Poiché gli andamenti dell'ampiezza in funzione dell'angolo risultano simili, per descrivere la procedura sarà mostrato un unico grafico a titolo esemplificativo (*Figura 15*).

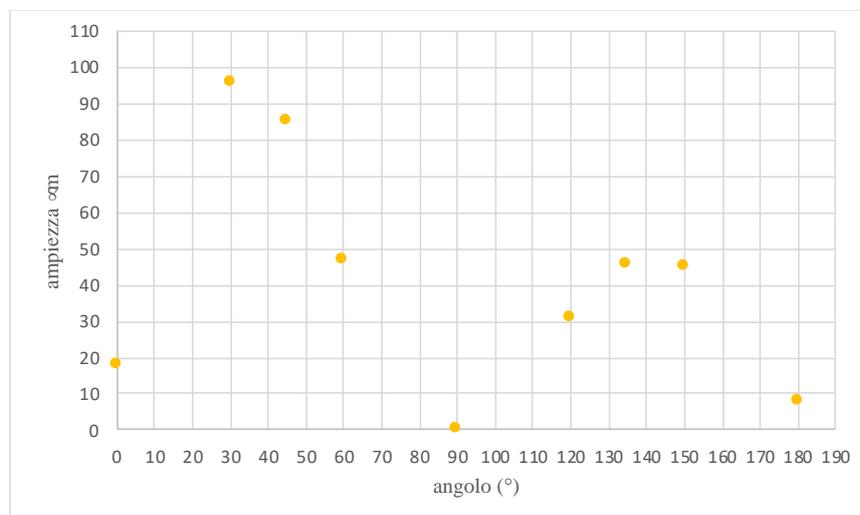


Figura 15. Grafico ampiezza-angolo nel caso di magnitudo 5.8 con $\text{dip} = 60^\circ$ e velocità di rottura pari a 2.5 km/s. Gli altri casi presentano andamenti pressoché simili ma ampiezze differenti.

Dal grafico si individuano i punti di massimo del diagramma di radiazione per le onde P. Emergono, inoltre, gli effetti del *radiation pattern* in corrispondenza di 0° , 90° e 180° . Questo andamento conferma che le simulazioni forniscono risultati attendibili.

2.3.2. Infittimento delle misure

Le misure sono state infittite in corrispondenza dei punti di massimo trovati nella fase precedente (*Figura 16*).

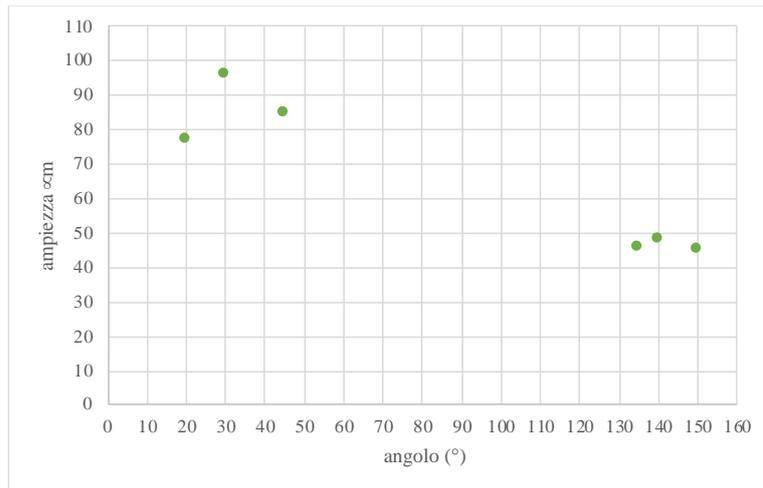


Figura 16. Infittimento delle misure in corrispondenza dei punti di massimo nel caso di magnitudo 5.8 con $\text{dip} = 60^\circ$ e velocità di rottura pari a 2.5 km/s. Gli altri casi presentano andamenti pressoché simili ma ampiezze differenti.

Come emerge dal grafico i due massimi, rispettivamente nell'intorno di 30° e in quello di 140° , non sono simmetrici rispetto ai 90° come ci si aspetterebbe dalla teoria (*Figura 12*). Ciò è dovuto al fatto che la faglia considerata nella simulazione non è perfettamente verticale ma presenta una certa inclinazione (il dip è 60°). In ogni caso, si conferma che l'ampiezza massima è prossima alla posizione direttiva mentre la minima a quella anti-direttiva.

2.3.2. Calcolo della pendenza e analisi dei risultati

Una volta ripetuta la procedura illustrata nei due paragrafi precedenti, sono state calcolate le pendenze associate al sismogramma delle onde P per ogni combinazione di magnitudo e velocità di rottura. Per il calcolo sono state considerate solo le ampiezze negli intorno dei punti di massimo ed i *rise time* presenti in *Tabella 1*. Infine sono stati ottenuti due grafici (*Figura 17*), uno per ogni velocità, che mostrano la pendenza in funzione dell'angolo confrontando tra loro le tre magnitudo considerate.

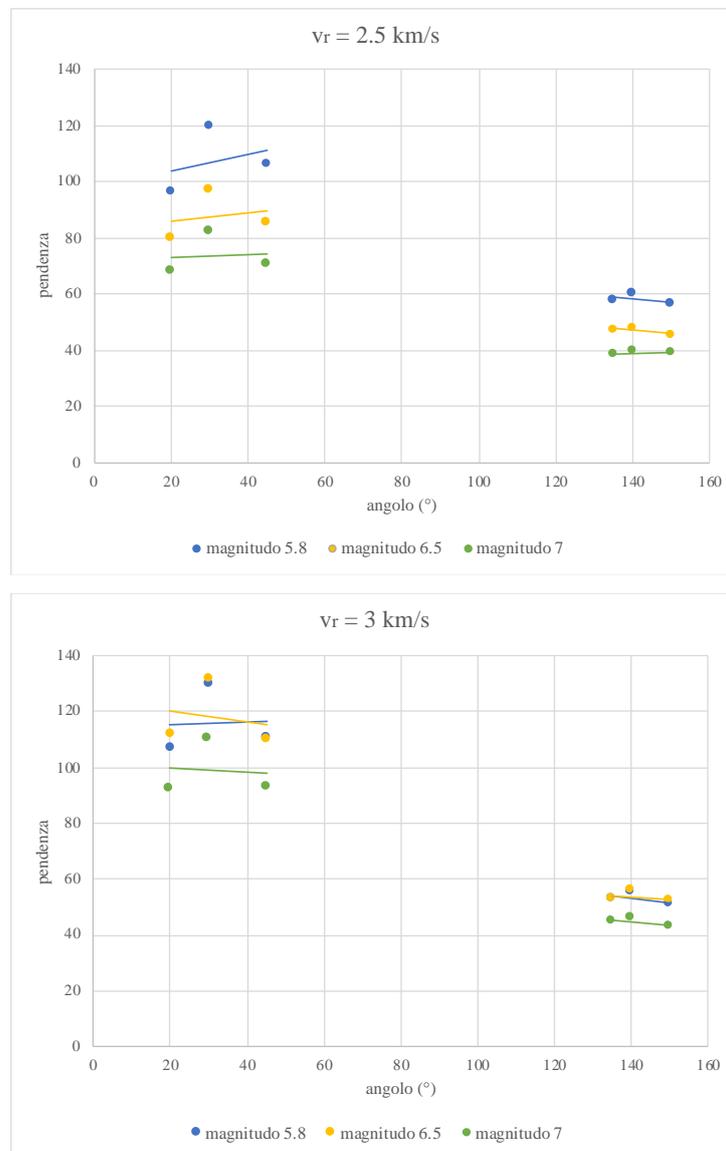


Figura 17. Grafici della pendenza in funzione dell'angolo per i tre diversi valori di magnitudo.

Dai grafici in *Figura 17* si può notare che la pendenza tende a decrescere con la magnitudo (ciò è più evidente nel grafico per $v_r = 2.5 \text{ km/s}$) il che si può spiegare con l'aumento del rise time, come evidenziato dalla (2. 3). Inoltre si può osservare una forte variabilità per singola magnitudo (differenza tra valore massimo in posizione direttiva e valore minimo in posizione anti-direttiva) dovuta agli effetti di direttività della stazione.

Infine, confrontando tra loro i due grafici, emerge come l'aumento della velocità di rottura comporti un ulteriore aumento della variabilità, leggermente più marcato nel caso di terremoti a magnitudo maggiore la qual cosa si può spiegare grazie alla (2. 1). Infatti, una lunghezza maggiore (associata a magnitudo più alte) risentirà in misura più grande delle variazioni di velocità rispetto ad una lunghezza più piccola come è il caso di quella associata alla magnitudo 5.8.

In ogni caso, bisogna tenere conto che le simulazioni ed i parametri scelti sono frutto di alcune approssimazioni e che il caso di magnitudo 5.8 potrebbe essere meglio rappresentato dal modello a faglia circolare di *Brune*.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato applicato il modello a faglia rettangolare di Haskell per la simulazione di alcuni terremoti al fine di calcolare la pendenza associata all'arrivo delle onde P.

Dalle simulazioni sono stati ottenuti i seguenti risultati.

- Il modello risulta ben approssimato dal codice adoperato: le curve hanno la forma prevista dalla teoria, i parametri calcolati risultano coerenti con quanto atteso.
- Sono stati trovati i picchi di massimo nel diagramma di radiazione delle onde P in posizioni conformi a quanto ipotizzato dalla teoria.
- È stata misurata la pendenza associata alle curve e si è dedotto che essa risulta in parte dipendente dalla velocità di rottura della faglia che ne aumenta la variabilità e, soprattutto, fortemente dipendente dalla posizione del ricevitore. Per cui utilizzare misure di pendenza su poche stazioni come rappresentative della magnitudo potrebbe risultare fuorviante. La variabilità osservata nelle simulazioni risulta comunque compatibile, seppur inferiore, a quanto osservato nei recenti studi basati su dati reali (Colombelli et al., 2020).

Bibliografia

Colombelli, S., Festa, G., Zollo, A. *Early rupture signals predict the final earthquake size*, Geophysical Journal International, Volume 223, Issue 1, October 2020, Pages 692–706, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa343>

Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, Lee Minner (2003) “SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers”. Invited contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.

Hanks, T. C., e Kanamori, K. (1979). *A Moment Magnitude Scale*. J. Geophys. Res, **84**, 2348-2350.

Melgar, D., e Hayes, G. P. (2017). *Systematic observations of the slip pulse properties of large earthquake ruptures*. Geophys. R. Lett, **44**, 9691-9698.

Wells, D. L., e Coppersmith, K. J. (1994). *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. Bull. Seism. Soc. Am., **84**, 974-1002.

Zollo A. e Emolo A. *Terremoti e Onde , Metodi e pratica della sismologia moderna*. Liguori Editore, 2011.