

## **DISCIPLINA: MODELAGEM NUMÉRICA DE ONDAS SÍSMICAS (3 CRÉDITOS)**

1. Revisão de Fortran 90: declaração de variáveis e constantes, leitura e escrita de dados formatados e não formatados (arquivos binários), estruturas de programação, módulos, alocação dinâmica, funções e sub-rotinas;
2. Revisão das equações da elasticidade: equações de primeira ordem em tensões e velocidades, equações de segunda ordem em deslocamentos, aproximações para o caso isotrópico vertical transverso e para o caso isotrópico, o caso acústico, equações de primeira ordem, a equação acústica da onda e aproximação para gradiente de densidade pequeno;
3. O Método das Diferenças Finitas (MDF): malhas e operadores de diferenças finitas, esquemas explícitos e implícitos, propriedades das equações de diferenças, estabilidade e dispersão numérica;
4. Modelagem acústica com MDF: esquemas de malha simples e de malha intercalada (segunda e quarta ordens), aplicação da fonte sísmica, condição de contorno não reflexiva (CCNR), camadas de amortecimento (CA), critérios de estabilidade e não dispersão numérica;
5. Modelagem elástica com MDF: formulações para as equações de segunda ordem em deslocamentos, formulações para as equações de primeira ordem em tensões e velocidades, tanto para meios isotrópicos como para meios VTI (isotropia vertical transversa).
6. Migração Reversa no Tempo: revisão de empilhamento, seção zero offset, modelo do refletor explosivo e princípio do imageamento, MRT zero-offset e com offset (pós- e pré-empilhamento); implementação computacional.

---

## **NUMERICAL MODELING OF SEISMIC WAVE PROPAGATION (3 CREDITS)**

1. Review of Fortran 90: declaration of variables and constants; programming elements, reading and writing formatted and unformatted (binary files) data, use of modules, dynamic allocation, functions and subroutines;
2. Review of equations of elasticity and acoustics: first order equations in tension and velocities, second-order equations in displacements; transverse vertical isotropic (VTI) media and the isotropic media; simplification for the acoustic case, the first order equations, acoustic equation wave for general media and for media with small density gradient;
3. The finite difference method (MDF): simple and staggered grid formulations, finite difference operators; explicit and implicit schemes, properties of difference equations, stability and numerical dispersion.

4. Acoustic modeling with MDF: schemes in single and staggered grids (in second and fourth orders in space), application of seismic source, non-reflective boundary condition (CCNR), absorbing boundary conditions (ABC); stability criteria, criterion to avoid numerical dispersion;
5. Elastic modeling with MDF: simples and staggered grid formulations, formulations for second-order equations in displacements (or velocities) and formulations for the first-order equations in terms of stresses and velocities; formulations for isotropic media and VTI media;
6. Reverse time migration (RTM): basic processing review, stacking, zero offset section; the explosive reflector model and principle of imaging, zero-offset RTM and RTM with offset (post- and pre-stack); computational implementation and practical aspects.

---

### MODELAJE NUMÉRICA DE ONDAS SÍSMICAS (3 CRÉDITOS)

1. Revisión de Fortran 90: Declaración de variables y constantes, la lectura y escritura de datos formateados y archivos binarios, la programación de las estructuras, módulos, la asignación dinámica, funciones y subrutinas;
2. Examen de las ecuaciones de elasticidad: ecuaciones de primer orden en la tensión y la velocidad, ecuaciones de segundo orden en los desplazamientos, se acerca a la caja vertical transversal isotrópico y el caso isótropo, el caso acústica, las primeras ecuaciones de orden, la ecuación acústica onda y el enfoque de gradiente de baja densidad;
3. El método de diferencias finitas (MDF): mallas y operadores en diferencias finitas, esquemas explícitos e implícitos, las propiedades de las ecuaciones en diferencias, la estabilidad y la dispersión numérica;
4. Modelado acústico con MDF: esquemas de bucle único y el bucle intercalada (segundo y cuarto órdenes), la aplicación de la fuente sísmica, condición de borde no reflectante (CCNR), capas de amortiguación (CA), criterios de estabilidad y se propaga numérica;
5. Modelado elástico con MDF: formulaciones para ecuaciones de segundo orden en los desplazamientos, las formulaciones para las primeras ecuaciones de orden en las tensiones y velocidades, tanto en medios isótropos y para los medios de VTI (isotrópico transversal vertical).
6. La migración inversa en el tiempo (RTM): revisión de apilamiento, la sección de traslados de origen, el modelo reflector explosivo y principio de las imágenes, RTM cero y Desplazamiento (post y pre-stack); implementación computacional.

## Bibliografia / Bibliography / Bibliografía:

- Cunha, R.D., 2011, Programação Científica em FORTRAN 95, Clube dos Autores.
- Di Bartolo, L., 2013, Introdução à Modelagem Sísmica utilizando o MDF, Apostila Minicurso UNICAMP (6h).
- Chapman, C.H., 2004, Fundamentals of seismic wave propagation, Cambridge University Press.
- Strikwerda, J.C., 2004, Finite difference schemes and partial differential equations, Siam.
- Kelly, K. R., Marfurt, K. J., 1980, Numerical Modeling of Seismic Wave Propagation, SEG, Geophysics reprint series n. 13.
- Alford, R. M., Kelly K. R, Boore, D. M., 1974, Accuracy of finite difference modeling of the acoustic wave equation, Geophysics, v 39, n. 6, pp.834-842.
- Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel, S., et al., 1976, Synthetic seismograms: a finite-difference approach, Geophysics, v. 41, n. 1, pp.2-27.
- Virieux, J., 1986, P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method. Geophysics, v 51, n. 4, pp.889-901.
- Levander A., 1989, Finite-difference forward modeling in seismology. In: James, D.(Ed), The encyclopedia of Solid Earth Geophysics, pp.410-430, New York.
- Levander A., 1988, Fourth-order finite-difference seismograms. Geophysics, v 53, n. 11, pp.1425-1436.
- Faria, E. L., Stoffa, P. L., 1994, Finite-difference modeling in transversely isotropic media, Geophysics, v. 59, n. 2, pp.282-289.
- Di Bartolo, L., 2010, Modelagem sísmica anisotrópica através do método das diferenças finitas utilizando sistemas de equações em 2ª ordem. Tese de Doutorado, COPPE/PEC.
- Di Bartolo, L., 2012, A new family of finite-difference schemes to solve the heterogeneous acoustic wave equation, Geophysics, v 77, n. 5, pp.T187-T199.