

## Referências Bibliográficas

AGGOUR, M. S., AND BROWN, C. B. **Retaining walls in seismic areas.** 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 1973

AL ATIK L.; SITAR N. **Experimental and Analytical Study of the Seismic Performance of Retaining Structures.** University of California, Berkeley, 2008.

BAKEER, R.M.; BATHIA S.K. **Earth Pressure Behind a Gravity Retaining Wall.** International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 13, 1989.

BARKAN. **Dynamics of bases and foundations.** McGraw-Hill, New York, 1962.

BATHE K.; WILSON E. **Numerical Methods in Finite Element Analysis.** Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976.

BISHOP A. **Test Requeriments for Measuring the Coeficient of Earth Pressure at Rest.** Conference on Earth Pressure Problems, Bruselas, Belgium, vol 1, 1958

BOLTON H.; WHITMAN R.V. **Design of Earth Retaining Strutures for Dynamic Loads.** Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1982.

BOLTON H., LAI S. **Dynamic Response of Long Valley Dam in the Mammoth Lake Earthquake series of may 25-27.** Earthquake Engineering Research Center, 1980.

BROOKER A.; IRELAND H. **Earth Pressures at Rest Related to Stress History.** Canadian Geotechnical Journal, vol 2, 1965.

CHEN W. **Limit Analysis and Soil Plasticity,** Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 1975.

CLOUGH G.; DUNCAN J. **Finite element analyses of retaining wall behavior.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971

DUNCAN JM; WRIGHT S.G. **Soil Strength and Slope Stability.** Jhon Wiley and Sons, Inc. 2005.

FRANKLIN, A. G. e CHANG, F. K. **Earthquake Resistance of Earth and Rockfill Dams.** Report 5: Permanent Displacement of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis, Miscellaneous Paper S-17, Soils and Pavement Laboratory, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 1977.

GAZETAS G. et al. **Seismic behavior of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation.** Soil Dynamics & Earthquake, 2004.

GEO-SLOPE International Ltd. **Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007.** Third Edition, 2008.

GREEN, R. A., OLGUN, C. G., EBELING, R. M., & CAMERON, W. I. **Seismically induced lateral earth pressures on a cantilever retaining wall.** Earthquake Engineering. 2003.

HALL J.; RICHART F. **Dissipation of Elastic Wave Energy in Granular Soils.** Journal Soil Mechanisms , and Found. Division, ASCE, Vol. 89, 1963

HARDIN, B. O. **The nature damping of sands.** J. Soil Mech. And Found. Div., ASCE, 91(1). 63-97, 1965.

HERRERA. F. **Modelagem do Comportamento Pós-Sismo de uma Barragem de Rejeito.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HUNTINGTON W.C. **Earth Pressures and Retaining Walls.** Jhon Wiley and sons Inc, 1957.

ITASCA CONSULTING GROUP INC. **Manual FLAC, version 5.0** Minneapolis, 2005.

JAKY J. **The Coefficient of Earth Pressure at Rest.** Journal of Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, 1944.

KRAMER S.L. **Geotechnical Earthquake Engineering**. University of Washington, Prentice-Hall, Inc, 1996.

KUHLEMEYER R.;LYSMER J. **Finite element method accuracy for wave propagation problems**. J. Soil Mech. Founds Div. ASCE, 1973.

LAI S.S.; BOLTON H. **Dynamic Response of long valley dam in the Mammoth lake Earthquake series of May 25-27, 1980**. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering of University of California, Berkeley, California, Report N°UCB/EERC-85/12, November 1985.

LEMOS S.; DE FÁTIMA M. **Mecânica dos solos II – Conceitos Introdutórios**. Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, 1997.

LYSMER J.;KUHLEMEYER R. **Finite dynamic model for infinite media**, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE,1969.

MARTINS F.F.; MARTINS J.B. **Métodos Rígido-Plásticos e Métodos Elástico-Perfeitamente Plásticos para obtenção do Coeficiente de Segurança na Avaliação da Estabilidade de Taludes**. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, 2004.

MATSUO, H., AND OHARA, S. **Lateral earth pressure and stability of quay walls during earthquakes**. Earthquake Engineering, Second World Conference, Tokyo, Japan, 1. 1960.

MAYNE P.; KULHAWY F.  **$K_0$  –OCR relationships in soil**. Journal of Geotechnical Engineering, vol 108, 1982.

MONONOBE N. **On the determination of earth pressures during earthquakes**. Procediment of the World Engineering Congress, Tokyo, Japan, 1929.

NADIM F.;WHITMAN R.V. **A Numerical Model for Evaluation of Seismic Behavior of Gravity Retaining Walls**. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1982.

NAVFAC. **Foundations and earth structures**. *Design Manual 7.2*, U.S. Department of the Navy, Alexandria, 1982.

NEWMARK N. **Effects of earthquakes on dams and embankments.** Geotechnique, Volume 115, No. 2, 1965.

OKABE S. **General theory on earth pressure and seismic stability of retaining and dam.** Journal of Japan Society of Civil Engineers, 1926.

ORTIZ L.A. **Dynamic centrifuge testing of cantilever retaining walls.** Dissertation submitted to the Institute of Technology Pasadena, California in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor, Pasadena, California, 1982.

OSTADAN F. **Seismic Soil Pressure for Building Walls-An Updated Approach.** Bechtel Corporation, San Francisco, CA, 2004.

PANG WONG CH.; WHITMAN R.V. **Seismic Analysis and Improved Design Procedure for Gravity Retaining Walls.** Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1982.

PAULSEN S.B. **A Numerical Model for Estimation Seismic Displacements of Reinforced Steep Slopes.** Dissertation submitted to the University of Washington, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, Washington, 2002.

PÉREZ J.Z. **Análise Numérica do Comportamento de Cortinas Atirantadas em Solos.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PERLOFF W.H. & BARON W. **Soil Mechanics, principles and applications.** Jhon Wiley & sons, Inc, 1976.

PLAXIS. **Finite Element Code for Soil and Rock Analyses.** Reference Manual, version 8.2, 2004.

QUIGLEY D.W.; DUNCAN J.M. **Earth Pressures on Conduits and Retaining Walls.** Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1978.

RICHARDT JR, F.E.; HALL JR, J.R.; WOODS, R.D. (1970). **Vibrations of Soils and Foundations.** Prentice-Hall International Series, 414 p.

RICHARDS R.Jr; ASCE M;ELMS D.G. **Seismic Behavior of Gravity Retaining Walls.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, April 1979.

ROCA M.E. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Análise da Estabilidade de Taludes em Solo.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SCOTT, R. F. **Earthquake-induced earth pressures on retaining walls.** Earthquake Engineering. Fifth World Conference, Rome, Italy, 2. 1973

SEED H. IDRIS I. **Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, 1969.

SEED H.B. and Idris, I.M. **Soil Moduli and damping factors for dynamic response analysis.** Repor No UCB/EERC-70/10, U.C. Berkeley, December 1970.

SEED H.; WHITMAN R. **Design of earth retaining structures for dynamic loads.** ASCE Specialty Conference, Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, 1970.

SHERIF M.;FANG Y.  **$K_a$  Dynamic earth pressures on walls rotating about the top.** Soils and Foundations,1984.

SHERIF M.;FANG Y.  **$K_a$  and  $K_0$  behind rotating and non-yielding walls.** Journal of Geotechnical Engineering,1984.

SHERIF M. et al. **Earth pressure against rigid retaining walls,** Journal of the Geotechnical. Engineering Division, ASCE,1982.

SIDDHARTHAN, R.; et al. **Simple rigid plastic model for seismic tilting of rigid walls.** Journal of Structural Engineering, vol. 118, 1992.

SIDDHARTHAN, R.; MARAGAKIS, E. **Performance of Flexible Retaining Walls Supporting Dry Cohesionless Soils Under Cyclic Loads.** International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 13, 1989.

SOTO C.H. **Estabilidade e Deformação de Taludes de Solos sob Carregamento Sísmico.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

STADLER A. T. **Dynamic centrifuge testing of cantilever retaining walls.** PhD Thesis. University of Colorado at Boulder, 1996.

STEEDMAN R.; ZENG X. **The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall.** Geotechnique, 1990.

STEVENS, H. W., **Measurement of the complex Moduli and damping of Soil under Dynamic Loads.** U.S. Army Cold regions Research and Eng. Laboratory, 1966.

TAJIMI, H. **Dynamic earth pressures on basement wall.** Earthquake Engineering, Fifth World Conference, Rome, Italy, 2. 1973.

TERZAGHI K. **Theoretical Soil Mechanics.** John Wiley and Sons, INC, Cambridge, Mass. 1943

TERZAGHI K.; PECK R. **Soil Mechanics in Engineering Practice,** 2nd Ed., Jhon Wiley and sons, New York, 1967.

TOWHATA I; ISLAM M. **Prediction of lateral displacement of anchored bulkheads induced by seismic liquefaction.** Soils Found, 1987

VELETSOS, A. S., E YOUNAN, A. H. **Dynamic response of cantilever retaining walls.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123(2): 161-172. 1997

VERRUIJT A. **Soil Mechanics.** Department of Civil Engineering of the Delft University of Technology, VSSD. First Edition, 2007.

VITORETI, M.M. **Análise da interação solo-estrutura em fundações de concreto armado pelo método dos elementos finitos.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WEISSMANN G.; HART R. **Damping Capacity of Some Granular Soils,** ASTM STP No. 305, 1961.

WHITE, W. *et al.* **Unified Boundary for Finite Dynamic Models.** Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977.

WHITMAN. **Stress – Strain – Time Behavior of Soil in One Dimensional Compression.** Rep. R63-25, Dept. Civil Eng. Massachusetts, 1963.

WHITMAN, R.V.; LIAO S. **Seismic Design of Gravity Retaining Walls.** Department of Civil Engineering, Massachusetts, Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1985

WHITMAN, R. **Seismic Design and Behavior of Gravity Retaining Walls,** ASCE Soil Mechanics Specialty Conference, Geotechnical Special Publication No. 25,1990

WHITMAN, R.V. **Seismic Design of Earth Retaining Structures.** Second International Conference of Recent Advances in Geotechnical Earthquake and Soil Dynamics, Paper N° SOA6, St Louis, Missouri, 1991.

WONG, C. **Seismic analysis and an improved design procedure for gravity retaining walls,** M.S. Thesis. Department of Civil . Engineering MIT, Cambridge, USA,1982.

WOOD, J. H. **Earthquake Induced Soil Pressures on Structures.** PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA,1973.

WOODWARD P.K.; GRIFFITHS D.V. **Comparison of the pseudo-static and dynamic behavior of gravity retaining walls.** Geotechnical and Geological Engineering, 1996.

ZABARRI-KASHANI K. **Sliding of gravity retaining wall during earthquakes considering vertical accelerations and changing inclination of failure surface.** Ms thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA,1979.

# APÊNDICE

## A.1. Método de Newmark (1965)

O fato de que as acelerações induzidas por um sismo variam com o tempo, faz com que as forças de inércia e os correspondentes fatores de segurança pseudo-estáticos também variem durante um terremoto. Se as forças de inércia atuantes na potencial massa de solo instável tornaram-se grandes o suficiente de modo que a resultante das forças ativas (estáticas e dinâmicas) seja superior à resistência ao cisalhamento desenvolvida ao longo da potencial superfície de deslizamento, então o fator de segurança pseudo-estático de um talude será inferior a 1 e a massa de solo não estará mais em equilíbrio estático.

Esta situação é análoga à de um bloco rígido sobre um plano inclinado (Figura A.1), analogia usada por Newmark (1965) para desenvolver o método que leva o seu nome.

O método de Newmark está baseado em várias hipóteses simplificadoras, quais sejam:

- a) o solo comporta-se como material rígido-perfeitamente plástico;
- b) os deslocamentos do solo ocorrem ao longo de uma única e bem definida superfície plana;
- c) o solo não sofre perda de resistência em consequência do carregamento sísmico;
- d) a resistência ao cisalhamento é igualmente mobilizada ao longo da superfície potencial de deslizamento.

Adicionalmente, na prática da engenharia as seguintes hipóteses também são usualmente assumidas:

- e) As resistências estática e dinâmica do solo são iguais;
- f) a aceleração de escoamento  $a_y$  permanece constante;
- g) os deslocamentos do bloco (massa de solo instável) ocorrem somente no sentido descendente;
- h) embora as superfícies de deslizamento em taludes de solo sejam curvas, a analogia do bloco rígido deslizante sobre uma superfície plana é ainda aplicável, admitindo-se que as mesmas não apresentam curvatura muito acentuada.

A primeira etapa de cálculo consiste em determinar a aceleração de escoamento  $a_y$  da massa de solo instável (Figura A.1a) usualmente expressa em função do coeficiente sísmico de escoamento  $k_y = a_y/g$ . O coeficiente sísmico de escoamento é aquele que produz um coeficiente de segurança pseudo-estático FS = 1. Neste ponto vale lembrar, como ressaltado por Duncan e Wright (2005), que em vez de se tentar localizar a superfície potencial de ruptura com menor fator de segurança, as análises pseudo-estáticas são executadas para localizar a superfície potencial de deslizamento com o mínimo valor de  $k_y$ . Ambas as superfícies não são geralmente coincidentes.

A condição de equilíbrio limite (FS = 1) na massa de solo de peso W é causada por uma excitação que se propaga, em relação à Figura A.1a da direita para a esquerda, com aceleração de escoamento  $a_y$ . Este valor de aceleração é limitado pela resistência ao cisalhamento desenvolvida ao longo da potencial superfície de deslizamento; caso a aceleração aumente, então a massa desliza. Pelo princípio de d'Alembert, a aceleração de escoamento é representada por uma força de inércia  $a_y W/g$  (ou  $k_y W$ ), aplicada pseudo-estaticamente no centro de gravidade da massa instável, formando um ângulo  $\theta$  com a horizontal, no sentido oposto ao da aceleração.

A Figura A.1b mostra o polígono de forças para a condição de equilíbrio limite, onde o ângulo de inclinação  $\theta$  da força de inércia pode ser determinado como aquele que minimiza  $k_y$ . Seu valor é usualmente alguns graus diferentes de zero, sendo geralmente admitido nulo (Franklin e Chang, 1977), o que implica na desconsideração da componente vertical da aceleração de escoamento. O ângulo  $\alpha$  indica a direção da resultante  $S$  das tensões cisalhantes na interfase da massa de solo instável sendo determinado com base na análise de estabilidade pseudo-estática da massa de solo.

O mesmo polígono de forças se aplica ao modelo de Newmark (Figura A.1c) onde o bloco rígido deslizante em plano inclinado com ângulo  $\alpha$  representa a massa de solo em deslizamento. É usualmente assumido que a resistência aos deslocamentos talude acima é bastante grande ( $k'_y > k_y$ ) tal que todos os deslocamentos do bloco são descendentes (Figura A.1d).

Se a base é sujeita a uma seqüência de pulsos de aceleração (registro sísmico) grandes o suficiente para induzir o deslizamento do bloco, então pela segunda lei de Newton a equação da aceleração  $a_{rel}$  do bloco em relação à base pode ser escrita e integrada numericamente (duas vezes), em relação ao tempo, para obtenção dos deslocamentos permanentes.

$$a_{rel} = (\ddot{u}_b(t) - a_y) [\cos(\alpha - \theta - \delta) / \cos \delta] \quad (A.1)$$

ou 
$$a_{rel} = (\ddot{u}_b(t) - a_y) \beta$$

onde  $\delta$  é o ângulo de atrito na interface com o plano inclinado e  $\ddot{u}_b(t)$  a aceleração da base, correspondente àquela atuante na profundidade da massa de solo instável, assumida como a aceleração conhecida do sismo multiplicada por um fator de amplificação (ou atenuação) que considere a resposta dinâmica do talude de solo. É também assumido que  $\alpha$ ,  $\delta$  e  $\theta$  não variem com o tempo, i.e.  $\beta$  é constante. Ao final da integração da parcela  $(\ddot{u}_b(t) - a_y)$  o valor final é multiplicado pela constante  $\beta$ , cujo valor depende das propriedades do solo e do resultado da análise de estabilidade pseudo-estática. Para a maioria dos problemas

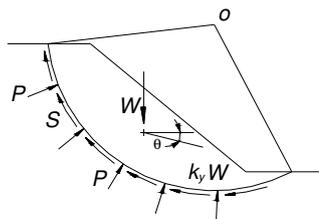
práticos, de acordo com Franklin e Chang (1977),  $\beta$  pode ser assumido igual a 1, e geralmente difere da unidade em menos do que 15%.

A segunda etapa do método de Newmark convencional é o processo de integração, ilustrado graficamente na Figura A.1e, onde é mostrada a variação da velocidade da base em relação ao tempo. Como a tangente à curva de velocidades representa uma aceleração, então os segmentos de reta com inclinação  $a_y$ , traçados a partir dos pontos onde  $a_y$  é ultrapassado, definem as curvas de velocidade de deslizamento do bloco. A área hachurada entre as curvas (Figura A.1e) representa o valor do deslocamento permanente do bloco. Note que o bloco continua a se mover em relação à base mesmo quando  $\ddot{u}_b$  torna-se menor do que  $a_y$ . O valor absoluto da velocidade do bloco continua a variar linearmente com o tempo até que as velocidades do bloco e da base coincidam.

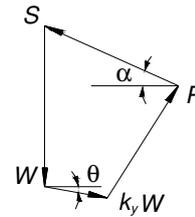
Este processo de dupla integração também é ilustrado na Figura A.2 para um registro de acelerações observado durante o sismo de Loma Prieta em 1989, na ilha Treasur, onde  $a_y = 0,125g$  (Smith (1995)). O movimento do bloco somente se inicia no ponto 1, quando a aceleração de escoamento é ultrapassada, possibilitando, a partir deste instante, o cálculo da velocidade e do deslocamento relativos do bloco em relação ao plano inclinado pela integração no tempo do registro das acelerações. A velocidade relativa atinge um valor máximo quando a aceleração aplicada retorna ao valor da aceleração de escoamento  $a_y$  (ponto 2), produzindo deslocamentos que somente cessam no ponto 3, quando a velocidade relativa torna-se nula.

No artigo original de Newmark (1965) a força de inércia é aplicada no centro de gravidade da massa de solo instável, paralela ao plano inclinado (ou na direção do movimento inicial do centro de gravidade), mas na maioria das aplicações da literatura a força de inércia é admitida horizontal. Kramer e Lindwal (2004) compararam os resultados obtidos considerando ambas as hipóteses e concluíram que a estabilidade não é sensível à direção da força de inércia, podendo-se obter resultados com boa aproximação através da usual hipótese de acelerações horizontais. Sarma (1975) também concluiu que o fator de segurança

pseudo-estático e os deslocamentos permanentes são insensíveis à inclinação da força de inércia  $e$ , conseqüentemente, as acelerações horizontais podem ser usadas em análises de estabilidade sem provocar muito erro. Yan et al. (1996) e Ling et al. (1997) observaram também apenas modestas variações de deslocamento permanente do talude quando acelerações verticais são consideradas.

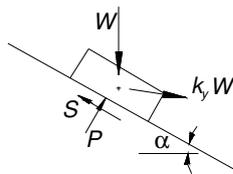


(a) Massa de solo instável

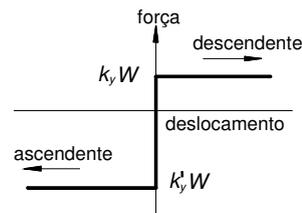


(b) Polígono de forças para

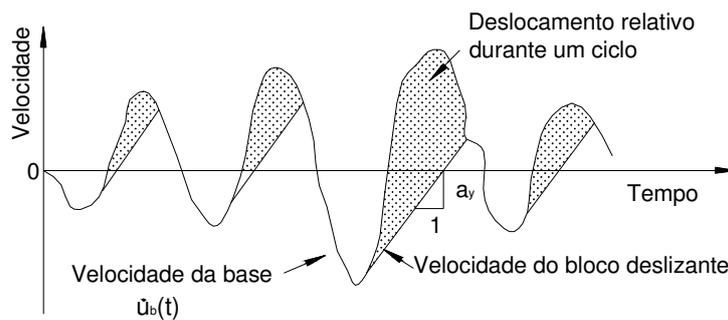
FS=1



(c) Modelo de bloco deslizante



(d) Relação força-deslocamento



(e) Cálculo do deslocamento permanente

Figura A.1 – Principais componentes do modelo de bloco rígido deslizante (Hynes-Griffin e Franklin, 1984)

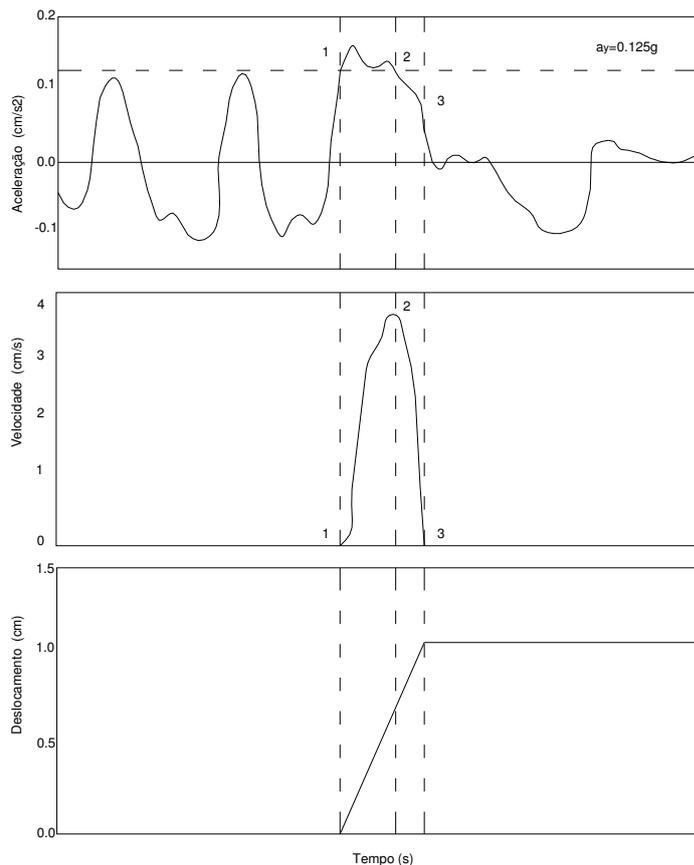


Figura A.2 – Procedimento da dupla integração no tempo no método de Newmark-Smith (1995).

Várias modificações foram feitas desde 1965 para melhorar a capacidade de previsão de deslocamentos do método de Newmark, dentre as quais as propostas por Lemos e Coelho (1991) e Tika-Vassilikos et al (1993) que sugeriram métodos para incorporar um ângulo de atrito dependente da taxa de deformação de modo a considerar a variação da resistência ao cisalhamento durante o terremoto. Outra proposição da literatura é admitir a resistência ao cisalhamento do solo dependente do nível das deformações permanentes, visto que solos reais exibem propriedades de endurecimento (*strain-hardening*) ou amolecimento (*strain-softening*) plásticos não incorporados no modelo de Newmark original. O método de Newmark (1965) incorpora dois dos principais fatores que influenciam os deslocamentos permanentes provocados em solos por terremotos, i.e. a estabilidade do massa (aceleração de escoamento  $a_y$ ) e as características do registro sísmico (amplitude e duração). Todavia, sua precisão é limitada pela hipótese de bloco rígido, pois solos são materiais deformáveis.