

7 Referências bibliográficas

- ABAQUS. **Abaqus 6.14 User's manuals**. Abaqus Inc., Pawtucket, RI, USA, 2014.
- ACHENBACH, J. D. **Wave propagation in elastic solids**, Elsevier, Netherlands, 1975.
- AIMONE, C.T. **Three-dimensional wave propagation model of full-scale rock fragmentation**. Northwestern University, 285. 1982.
- ARAÚJO, T. D. **Simulação adaptativa de fraturamento elasto-plástico**. 1999. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- ARREA, M.; INGRAFFEA, A. R. **Mixed mode crack propagation in mortar and concrete**. Department of Structural Engineering Report 81-13, Scholl of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY. 1982.
- ASH, R. L. **The influence of geological discontinuities on rock blasting**. 1973. Ph.D. thesis – Dept. Min. Eng., University of Minnesota.
- ATCHISON, T. C. **Fragmentation principles**. Surface mining, Ed. E. P. Pfeider, AIME, New York, p.355-372. 1968.
- BARENBLATT G. I. **The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture**. Adv Appl Mech, 7, p. 55-129. 1962.
- BARSOUM, R. S. **On the Use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 10, 25-37. 1976.
- BAZANT, Z. P.; PLANAS J. **Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials**, CRC Press, Boca Raton. 1998.

BEISSEL, S. R.; JOHNSON, G. R.; POPELAR, C. H. **An element-failure algorithm for dynamic crack propagation in general directions**. Engineering Fracture Mechanics 61, 407-425. 1998.

BELYTSCHKO, T.; FISH, J.; ENGELMANN, B. E. **A finite element with embedded localization zones**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 70 (1), 59–89, 1988.

BELYTSCHKO T.; BLACK T. **Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing**. International Journal for Numerical Methods in Engineering; 45(5), 601–620. 1999.

BELYTSCHKO, T.; LIU, WK.; MORAN B. **Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures**. Wiley: New York, 2000.

BELYTSCHKO, T.; CHEN, H. **Singular enrichment finite element method for elastodynamic crack propagation**. International Journal of Computational Methods, 1 (1), p. 1–15. 2004.

BELYTSCHKO, T.; CHEN, H.; XU, J; ZI, G. **Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 58, p. 1873–1905. 2003.

BENDEZU, M.; CARVALHO, E.; ROEHL, D.; ROMANEL, C. **Finite Element Modeling of the Hydraulic Fracture Problem in Impermeable Media Using a Cohesive Zone Model**. Ibero Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE XXXIV, November 10-13, Pirenópolis. 2013.

BHANDARI, S. **Engineering rock blasting operations**. Rotterdam, Balkema, p. 375. 1997.

BHANDARI, S.; VUTUKURI, V. S. **Rock fragmentation with longitudinal charges**. In: Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech. Denver, US, 1337–1342. 1974:

BORST de, R. **Computation of post-bifurcation and post-failure behavior of strain-softening solid**. Computers & Structures, v. 25, n. 2, p. 211-224. 1987.

BRINKMANN, J. R. **An experimental study of the effects of shock and gas penetration in blasting.** In: Proc. 3rd Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 3, Brisbane. 1990.

Australia, August 26–31, Published by AusIMM, 55–66

CAMACHO, G. T.; ORTIZ, M. **Computational modelling of impact damage in brittle materials.** International Journal of Solids and Structures 33 (20-22), p. 2899-2938. 1996.

CAMANHO, P.; DAVILA, C. **Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials.** NASA/TM-2002–211737, p. 1-37. 2002.

CELES, W.; PAULINO, G. H.; ESPINHA, R. **A compact adjacency-based topological data structure for finite element mesh representation.** International Journal Numerical Methods in Engineering, 64, p. 1529-1565. 2005.

CHEN, P.; HUANG, T.; YANG, J.; ZHANG, G.X. **Numerical simulation of rock fracture under dynamic loading using manifold method.** Eng. Mat 324–325, p. 235-238. 2006.

CHESSA, J.; BELYTSCHKO, T. **Arbitrary discontinuities in space–time finite elements by level sets and X-FEM.** International Journal for Numerical Methods in Engineering, 61, p. 2595-2614. 2004.

CHEVAUGEON, N.; XIN, J.; HU, P.; LI, X.; CLER, D, FLAHERTY, J.E.; SHEPHARD, M.S. **Discontinuous Galerkin Methods Applied to Shock and Blast Problems.** Journal of Scientific Computing, v. 22-23. 2005.

CHO, S. H.; KANEKO, K. **Influence of the applied pressure waveform on the dynamics fracture processes in rock.** International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences 41, p. 771-784. 2004-a.

CHO, S. H.; KANEKO, K. **Rock Fragmentation Control in Blasting.** Materials Transactions, v. 45(5), p. 1722-1730. 2004-b.

CHO S. NAKAMURA, Y. H.; MOHANTY, B.; YANG, H.S.; KANEKO, K. **Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting.** Engineering Fracture Mechanics 75, p. 3966–3984. 2008.

CUNNINGHAM, C.V.B. **Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model - four years on.** In Proceedings 2nd Int. Symp on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, p. 475-487. 1987. In: Hustrulid, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining.** v. 1. Rotterdam: Balkema, p. 301. 1999.

DAEHNKE, A.; ROSSMANITH, H.P.; KNASMILLNER, R. E. **Blast-induced dynamic fracture propagation.** Rock Fragmentation by Blasting, Mohanty, B. (ed.) FRAGBLAST 5, Montreal, Canada, p. 619-626. 1996.

DJORDJEVIC, N. **A two-component model of blast fragmentation.** In: The AusIMM Proceedings, Austrália: Brisbane, p. 9-13. 1999.

DONZE, F. V.; BOUCHEZ, J.; MAGNIER, S. A. **Modeling fractures in rock blasting.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34(8), p. 1153–1163. 1997.

DOWDING, C. H.; AIMONE, C. T. **Multiple blast-hole stresses and measured fragmentation.** Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 18, n. 1, p. 17-36. 1985.

DUGDALE, D.S. **Yielding of steel sheets containing slits.** J Mech Phys Solids, 8, p. 100-14. 1960.

DUVALL, W. I. **Strain-wave in rock near explosions.** Geophysics, v. 18, no 2. 1953.

DUVALL, W. I.; ATCHISON, T. C. **Rock breakage by explosives.** U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation 5356, p. 52. 1957.

DVORKIN, E. N.; CUITINO, A. M.; GIOIA, G. **Finite elements with displacement interpolated embedded localization lines insensitive to mesh size and distortions.** International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 30 (3), 541–564. 1990.

FAKHIMI, A.; LANARI, M. **DEM–SPH simulation of rock blasting.** Computers and Geotechnics 55, 158–164. 2014.

FICKETT, W.; DAVIS, W.C. **Detonation theory and experiment**. Berkeley: Univ. California Press. 1979.

FIELD, J. E.; LADEGAARD-PEDERSON, A. **Fragmentation processes in rock blasting**. Dachea-Monographier, 69. 1972.

FIRTH, I.R.; TAYLOR, D.L. **Bench blast modeling using numerical simulation and Mine planning software**. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration – SME 26 - 28, Denver, Colorado. 2001.

FOURNEY, W. L. **Mechanisms of rock fragmentation by blasting**. Comprehensive Rock Engineering; Principles, Practice & Projects, Pergamon Press, England, p. 39-69. 1993.

FOURNEY W.L.; DALLY J.W.; HOLLOWAY D.C. **Controlled blasting with ligamented charge holders**. Int J. Rock Mech Min Sci 15, p. 121-129. 1978.

FOURNEY, W. L., DICK, R. D., WANG, X. J., WEI, Y. **Fragmentation mechanism in crater blasting**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 30(4), p. 413-429. 1993.

FRANTZOS, D. C. **Finite element analysis of radial cracking mechanism around blastholes using measured pressure-time curves for low density ammonium nitrate=fuel oil**. PhD thesis. Dep. Mining Eng., Queen's Univ., Canada, p 290. 1989.

FRIES, T.P.; BELYTSCHKO, T. **The intrinsic XFEM: a method for arbitrary discontinuities without additional degrees**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 68, p. 1358-1385. 2006.

GHOSH, A.; DAEMEN, J. J. K. **Rock fragmentation in bench blasting - A numerical study**. Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, p. 553-558. 1995.

HAGEN T. N.; JUST G. D. **Rock breakage by explosives - theory, practice and optimization**. In Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver, p. 1349. National Academy of Sciences, Washington, DC. 1974.

HAGHIGHI, R. H.; KONYA, C. J.; LUNDQUIST, R. G. **Finite element modeling of rock breakage mechanism**, 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, SD, June, p. 651-658. 1985.

HAO, H.; WU, C.; ZHOU, Y. **Numerical Analysis of Blast-Induced Stress Waves in a Rock Mass with Anisotropic Continuum Damage Models. Part 1: Equivalent Material Property Approach**. Rock Mechanic Engineering 35(2), p. 79-94. 2002.

HANSBO, A.; HANSBO, P. **A finite element method for the simulation of strong and weak discontinuities in solid mechanics**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 193, no. 33-35, p. 3523-3540. 2004.

HENSHELL, R. D.; SHAW, K. G. **Crack Tip Finite Elements are Unnecessary**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 9, 495-507. 1975.

HINO, K. **Fragmentation of Rock Through Blasting and Shock Wave Theory of Blasting**. Symp. on Rock Mech., Quart. Colorado School of Mines, vol. 51, no. 3, p. 191-209. 1956a.

HINO, K. **Fragmentation of Rock Through Blasting**. Quart. Colorado School of Mines, vol. 51, p. 189. 1956b.

HILLERBORG, A.; MODEER, M.; PETERSSON, P.E. **Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements**. Cem Concr Res 6, 773-782. 1976.

HOLLOWAY, D.C.; BARNHOLT, G.; WILSON, W.H. **A field study of fracture control techniques for smooth wall blasting**. In Proc. 27th US Symp Rock Mech., Tuscloosa, p. 456-463. 1986.

JIANG, G.; CHEN, S. **The Properties of Blasting Loading Transmitted in the Soil and Rocks Investigated by Numerical Simulation**. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering – EJGE, v. 17, p. 3897-3904. 2012.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F. J. A. **Drilling and blasting of rocks**. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. 1995.

JING, L. **A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering.** International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, 283-353. 2003.

JIRÁSEK, M. **Comparative study on finite elements with embedded discontinuities.** Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 188, 307=330. 2000.

JOHANSSON, C. H.; PERSSON, P. A. **Fragmentation systems.** Proc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech., v 1B, p. 1557-1566. 1974.

JUNG, W. J., UTAGAVA, M., OGATA, Y., SETO, M., KATSUYAMA, K., MIYAKE, A., OGAVA, T. **Effects of rock pressure on crack generation during tunnel blasting.** Jl. Japan Explosives Soc. 62(3), 138–146. 2001.

KUHLEMEYER, R. L.; LYSMER, J. **Finite element method accuracy for wave propagation problems.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 99, nº SM5, p. 421-427. 1973.

KUTTER, H. K., FAIRHURST, C. **On the fracture process in blasting.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 8, p. 181–202. 1971.

KUZNETSOV, V.M. **The mean diameter of the fragments formed by blasting rock.** Soviet Mining Science, p. 144-148. 1973. In: HUSTRULID, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining.** v. 1. Rotterdam: Balkema, p. 301. 1999.

LANGFORS, U.; KIHLSSTRÖM, B. **The Modern Technique of Rock Blasting.** Willey, New York, 1963.

LEE, E.L.; HORNING, H.C.; KURY, J.W. **Adiabatic expansion of high explosives detonation products.** Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, TID 4500-UCRL 50422. 1968.

LILLY, P.A. **An empirical method of assessing rock massing blastability.** LARGE OPEN PIT MINING CONFERENCE. THE AusIMM/IE AUST NEWMAN COMNINED GROUP, Austrália, p. 89-92. 1986.

LIMA, A. D. R. **Análise Numérica do Fraturamento Dinâmico de Rochas por Explosão.** 2001. 110 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

LIU, L.; KATSABANIS, P.D. **Development of a Continuum Damage Model for Blasting Analysis**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. v. 34, n. 2, p. 217-231. 1997

LYSMER, J. E.; KUHLEMEYER, R. L. **Finite dynamic model for infinite media**. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 95, n.º EM4, p. 859-877. 1969.

MA, G. W.; HAO, H.; ZHOU, Y.X. **Modeling of Wave Propagation Induced by Underground Explosion**. Computers and Geotechnics, v. 22, n. 3/4, p. 283-303. 1998.

MA, G. W.; AN, X. M. **Numerical simulation of blasting-induced rock fractures**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 45, 966–975. 2008.

MELENK, J. M.; BABUSKA, I. **The partition of unity element method basic theory and applications**. Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 39, 289-314. 1996.

MENOUEILLARD, T.; RÉTHORÉ, J.; COMBESURE A.; BUNG, H. **Efficient explicit time stepping for the extended finite element method (X-FEM)**. Int. J. for Numerical Methods in Engineering, 68 (9) p. 911–939. 2006.

MITELMAN, A.; ELMO, D. **Modelling of blast-induced damage in tunnels using a hybrid finite-discrete numerical approach**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 6, 565-573. 2014.

MOËS, N.; DOLBOW, J.; BELYTSCHKO, T. **A finite element method for crack growth without remeshing**. International Journal for Numerical Methods in Engineering; 46(1), 131–150. 1999.

MOHAMMADI, S. **Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures**. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2008.

MOHANTY, B. **Explosion generated fractures in rock and rock-like materials**. Eng. Fract. Mech. 35(4/5), 889–98. 1990.

MORAIS, J. L. **Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos**. 2004. 160 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais.

MORTAZAVI, A.; KATSABANIS, P. D. **Modelling burden size and strata dip effects on the surface blasting process.** Int. Journal Rock Mechanics and Mining Sciences 38, p. 481-98. 2001.

MUNJIZA, A.; OWEN, D.R.J.; BICANIC, N. **A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids.** Eng. Comput. 12, p.145-174. 1995.

NIE, S. L.; OLSSON, M. **Study of mechanism by measuring pressure history in blast holes and crack lengths in rock.** In Proc. 2th annual conf. Explosives and Blasting Technique. Orlando, US, p. 291-300. 2000.

NING, Y.L.; YANG, J.; MA, G. W.; CHEN, P. W. **DDA for dynamic failure problems and its application in rock blasting simulation.** Analysis of Discontinuous Deformation: New Developments and Applications, Singapore, v. 1, p. 83-90. 2010.

OBERT, L.; DUVALL, W. **The micro-seismic method of predicting rock failure in underground mining.** Part II, Laboratory experiments. US Bur Mines Rept. Inv. 3803. 1949.

OLIVER J.; HUESPE A.E.; SÁNCHEZ P.J. **A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs X-FEM.** Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195, 4732-4752. 2006.

OLSSON, M.; NIE, S.; BERGQVIST, I.; OUCHTERLONY, F. **What causes cracks in rock blasting?** In Proc. EXPL0200 1. Hunter valley, NSW, Australia, p. 191-196. 2001.

ORTIZ, M.; LEROY, Y.; NEEDLEMAN, A. **A finite element method for localized failure analysis.** Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. v. 61, (2), 189–214. 1987.

ORTIZ, M.; PANDOLFI, A. **Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis.** International Journal Numerical Methods in Engineering 44 (9), 1267–1282. 1999.

OWEN, D.R.J.; FAWKES, A J. **Engineering Fracture Mechanics.** Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K, p. 305. 1983.

PANDOLFI, A.; ORTIZ, M. **Solid modeling aspects of three-dimensional fragmentation**. Engineering with Computers 14(4), 287-308. 1998.

PAPOULIA, K. D.; VAVASIS, S. A.; GANGULY, P. **Spatial convergence of crack nucleation using a cohesive finite-element model on a pinwheel-based mesh**. International Journal Numerical Methods in Engineering 67(1), 1–16. 2006.

PARK, K.; PAULINO, G. H.; ROESLER, J. R. **A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture**. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 57 (6), 891–908. 2009.

PARK, K.; PAULINO, G. H.; CELES, W.; ESPINHA, R. **Adaptive mesh refinement and coarsening for cohesive zone modeling of dynamic fracture**. Int. J. Numer. Meth. Eng. (92), 1-35. 2012.

PERSSON, P.-A.; LUNDBORG, N.; JOHANSSON, C. H. **The Basic Mechanisms in Rock Blasting**. Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics, Beograd. 1970.

PERSSON, P.A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering** CRC Press, Florida, USA, 1994.

PORTER, D. D; FAIRHURST, C. **A study of crack propagation produced by the sustained borehole pressure in blasting**. Proc. 12th Symp. Rock Mech., Univ. of Missouri-Rolla, 467. 1970

PREECE, D.S.; CHUNG, S.H. **Modeling Coal Seam Damage in Cast Blasting**. Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, February 7-10, Nashville, TB. 1998.

QIANG, H.; GAO, W. **Meshless Local Discontinuous Petrov-Galerkin Method with Application to Blasting Problems**. Trans. Tianjin Univ. 14, 376-383. 2008.

RABCZUK, T.; EIBL, J. **Simulation of high velocity concrete fragmentation using SPH/MLSPH**. Int. J. Numer. Methods Eng. 56, p.1421–1444. 2003.

RABCZUK, T.; ZI, G.; GERSTENBERGER, A.; WALL, W. **A new crack tip element for the phantom-node method with arbitrary cohesive cracks**. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering 75, p. 577-599. 2008.

RABCZUK, T. **Computational Methods for Fracture in Brittle and Quasi-Brittle Solids: State-of-the-Art Review and Future Perspectives**. Hindawi Publishing Corporation ISRN Applied Mathematics. Article ID 849231, 38 p. 2013.

RANDLES, P.W.; LIBERSKY, L.D. **Smoothed particle hydrodynamics: Some recent improvements and applications**. Comput. Meth. Appl. Mech. Eng 139, p. 375-408. 1996.

RAJU, I. S. **Calculation of strain-energy release rates with higher order and singular finite elements**. Engineering Fracture Mechanics, v. 28, n. 3. 1987.

REMMERS, J. J. C.; DE BORST, R.; NEEDLEMAN, A. **A cohesive segments method for the simulation of crack growth**. Computational Mechanics, v. 31, no. 1-2, p. 69-77. 2003.

REMMERS, J. J. C.; DE BORST, R.; NEEDLEMAN, A. **The simulation of dynamic crack propagation using the cohesive segments method**. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 56, no. 1, p. 70–92. 2008.

RÉTHORÉ, J.; GRAVOUIL, A.; COMBESCURE, A. **An energy-conserving scheme for dynamic crack growth using the extended finite element method**. Int. J. Numerical Methods in Engineering, 63, p. 631–659. 2005-a.

RÉTHORÉ, J.; GRAVOUIL, A.; COMBESCURE, A. **A combined space–time extended finite element method**. Int. J. Numerical Methods in Engineering, 64, p. 260–284. 2005-b.

RICE, J. R. **A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration for notches and cracks**. Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, v. 35, p. 379-386. 1968.

RINEHART, J. S.; FORTTIN, J. P.; BURGIN, L. **Propagation velocity of longitudinal waves in rock. Effects of state of stress, stress level of the waves, water content, porosity, temperature, stratification and texture**. Proc. 4th Symp. Rock Mech., Univ. Park, Penn, USA, p. 119-135. 1961.

ROTS, J. L.; NAUTA, P.; KUSTERS, G.M.A. **Smearred crack approach and fracture localization in concrete**. HERON, v. 30, no. 1. 1985.

ROTS, J. L. **Smearred and discrete representations of localized fracture.** International Journal of Fracture 51, p. 45-59. 1991.

RUEST, M.; CUNDALL, P.; GUEST, A.; CHITOMBO, G. **Developments using particle flow code to simulate rock fragmentation by condensed phase explosives,** Proc. 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting Fragblast'8, Santiago; Chile, p. 140-151. 2006

SAHARAN M. R.; MITRI, H. S. **Numerical Procedure for Dynamic Simulation of Discrete Fractures Due to Blasting.** Rock Mechanics and Rock Engineering 41 (5), 641–670. 2008.

SAHARAN M. R.; MITRI, H. S. **Numerical modelling investigations to study effect of geotechnical and explosive properties in limiting rock fracturing due to blasting in deep mining roadways.** 6th Asian Rock Mechanics Symposium, 23-27 October, New Delhi, India. 2010.

SAZID, M.; WASNIK, A. B.; SINGH, P. K.; KAINTHOLA, A.; SINGH, T. N. **A Numerical Simulation of Influence of Rock Class on Blast Performance.** Int. Journal of Earth Sciences and Engineering, v. 05, no. 5, p. 1189-1195. 2012.

SCHATZ, J.F.; ZEIGLER, B.J.; BELLMAN, R.A.; HANSON, J.M.; CHRISTIANSON, M. **Prediction and interpretation of multiple radial fracture stimulations.** Final report to Gas Research Institute, Chicago, Illinois, p. 290. 1987.

SELLERS, E.; FURTNEY, J. ONEDERRA, I.; CHITOMBO, G. **Improved understanding of explosive-rock interactions using the hybrid stress blasting model.** The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 112, p. 721-728. 2012.

SHARPE, J. A. **The production of elastic waves by explosion pressures.** Geophysics, v. 7, n. 23. 1942.

SHIH, C. F.; DELORENZI, H. G.; GERMAN M. D. **Crack extension modeling with singular quadratic isoparametric elements.** International Journal of Fracture, v. 12, p. 647-651. 1976.

SILVA, V. C. **Apostila do Curso de Desmonte de Rochas com Explosivo.** Instituto de Educação Tecnológica – IETEC. Belo Horizonte, 2013.

SISKIND, D. E. E FUMANTI, R. R. **Blast-produced fractures in Lithonia granite**. U. S. Bureau of Mines Report of Investigation 7901, 1974;

SJÖBERG, J.; SCHILL, M.; HILDING, D.; YI, C.; NYBERG, U. JOHANSSON, D. **Computer simulations of blasting with precise initiation**. ISRM International Symposium - EUROCK 2012, 28-30 May, Stockholm, Sweden. 2012.

SONG, J. H.; BELYTSCHKO, T. **Cracking node method for dynamic fracture with finite elements**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 77, no. 3, p. 360-385. 2009.

SONG, J.; KIM, K. **Blasting induced fracturing and stress field evolution at fracture tips**. Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, p. 546-552. 1995.

SONG, J. H.; AREIAS, P. M. A.; BELYTSCHKO, T. **A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes**. International Journal for Numerical Methods in Engineering 67, p. 868-893. 2006.

SONG, J. H.; WANG, H.; BELYTSCHKO, T. **A comparative study on finite element methods for dynamic fracture**. Comput. Mech. 42, 239-250. 2008.

STARFIELD, A. M. **Strain wave theory in rock blasting, failure and breakage of rocks**. Proceeding, Eighth Rock Mechanics Symposium, Minneapolis, 538-548. 1966.

STARFIELD, A. M.; PUGLIESE, J. M. **Compressional waves generated in rock by cylindrical explosives charges: a comparison between a computer model and field measurements**, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, v. 5, 67-77. 1968.

TAYLOR, L.; PRECCE, D. **Simulation of blasting induced rock motion using spherical element models**. Engineering Computations, v. 9, p. 243-252. 1992.

VALLIAPAN, S.; LEE, I. K.; MURTI, V.; ANG, K. K.; ROSS, A. H. **Numerical modelling of rock fragmentation**. In: Stephansson, O. (ed.), Proc. 1st Int. Symp. Rock Frag. By Blasting – FRAGBLAST 1. Balkema, Rotterdam, p. 375-390. 1983.

WANG, Z. L.; KONIETZKY, H. **Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses**. Engineering Fracture Mechanics 76, p. 1945-1955. 2009.

WHITTAKER, B. N., SINGH, R. N. E SUN, G. **Rock fracture mechanics: principles, design e applications**. Elsevier, Amsterdam. 1992.

WU, E.M.; REUTER, R.C. **Crack extension in fiberglass reinforced plastics**. T. & AM Report No. 275, University of Illinois. 1965.

XU, X. P.; NEEDLEMAN, A. **Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids**. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 42(9), 1397–1434. 1994.

YU, Q.; NIE, L.; ZHOU, N. **Finite element analysis for blasting law of jointed rock mass**. Global Geology, 12 (4), 210-214. 2009.

ZEINAB, A.; MANSOUR, S. MOHAMMAD, N. **Simulation of Dynamic Fracturing of Continuum Rock in Open Pit Mining**. Geomaterials, v. 3, no. 3, p. 82-89. 2013.

ZHANG, Z.; PAULINO, G. H. **Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials**. International Journal of Plasticity 21 (6), 1195–1254. 2005.

ZHANG, Z.; PAULINO, G. H.; CELES, W. **Extrinsic cohesive modelling of dynamic fracture and microbranching instability in brittle materials**. International Journal Numerical Methods in Engineering 72(8):893–923. 2007.

ZHAO, G.; FANG, J.; SUN, L.; ZHAO, J. **Parallelization of the distinct lattice spring model**. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2011.

ZHAO, G.; KHALILLI, N.; FANG, J.; ZHAO, J. **A coupled distinct lattice spring model for rock failure under dynamic loads**. Computers and Geotechnics 42, 1-20. 2012.

ZHOU, Z.; ZHU, Z.; JIN, X.; TANG, H.; WANG, Y. **Numerical study of rock fracturing during blasting excavation**. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), p. 756 – 759. 2010.

ZHU, Z.; MOHANTY, B.; XIE, H. **Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks**. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences 44, p. 412-424. 2007-a.

ZHU, Z.; MOHANTY, B.; XIE, H. **Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks.** Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences 45, p. 111-121. 2007-b.

ZI, G.; CHEN, H.; XU, J; BELYTSCHKO, T. **The extended finite element method for dynamic fractures.** Shock and Vibration, v. 12, p. 9-23. 2005.

Apêndice A: Tipos de explosivos

O tipo de explosivo usado em qualquer projeto depende das características de dureza e estruturais da rocha e a geometria geral do corte (distância do furo a face livre, profundidade e largura). Existem numerosos tipos de explosivos, e para cada tipo existem várias concentrações diferentes e misturas. Propriedades a serem considerados na escolha de um explosivo incluem a sensibilidade, a densidade, a força, a resistência à água, gases, preço e disponibilidade.

Dinamite. É classificado de acordo com a sua percentagem em peso de nitroglicerina (percentagens variam entre 15 a 60%). A força não aumenta de forma linear com proporção. Por exemplo, dinamite 60% é ao redor de 1.5 vezes mais forte do que dinamite 20%.

Existem diversas variações na composição da dinamite:

- Dynamite comum consiste em nitroglicerina, nitrato de sódio e um combustível absorvente (tais como polpa de madeira) embrulhado em papel forte para fazer um cartucho cilíndrico.
- Dynamite gelatina consiste em um gel de nitrocelulose nitroglicerina. Está disponível em dosagens muito elevadas (até 90% de nitroglicerina), tornando-o útil para rocha extremamente dura.
- Dynamite amoniacal tem composição semelhante à dinamite comum, mas uma parte do conteúdo de nitroglicerina é substituída com nitrato de amônio para criar dinamite mais estável e menos dispendiosa. Tem uma força de aproximadamente 85% de dinamite reta.

ANFO (Nitrato de amônio e de óleo combustível). Esta combinação de um fertilizante de nitrogênio e óleo combustível tem substituído dinamite em médias e grandes de explosão de rochas. A explosão de ANFO aumenta com a concentração de óleo combustível (o máximo é de 6%). A mistura pode ser feita no local ou na fábrica, embora compostos pré-misturados apresentar preocupações sobre o manuseamento e armazenamento (pré-misturado ANFO tem sido conhecido por entrar em combustão espontaneamente quando mantidos em armazenamento durante longos períodos de tempo). Nitrato de amônio pode ser transportado e

armazenado da mesma forma que qualquer outro agente de explosiva. ANFO não queima bem em água, mas pode ser selado em sacos para evitar a infiltração de água.

Pastas (Aquagel). Também é conhecido como um agente abrasivo denso (DBS), pasta é uma mistura de um sensibilizador, um oxidante, água, e um espessante. O sensibilizador pode ser qualquer número de redução de produtos químicos, mas é geralmente TNT (trinitrotolueno). O oxidante é o nitrato de amônio. O agente espessante é goma de guar ou amido.

Alta densidade da pasta pode remover uma carga maior do que ANFO, o que permite a utilização de furos de pequeno diâmetro (ou um espaçamento maior dos furos) para obter a mesma potência explosiva e fragmentação. No entanto, o preço mais elevado da pasta pode compensar economizar custos de menos furos perfurados. As pastas são razoavelmente insensíveis, mas temperatura e densidade têm grandes efeitos (ou seja, as pastas tornam-se menos sensível e menos fluido de baixa temperatura). A sensibilidade pode ser aumentada pela adição de sensibilizadores à composição. As pastas de carga de cerca de três vezes mais rápido do que dinamite convencional, tornando-os mais conveniente e rápido de usar.

Emulsões. As emulsões são um tipo explosivo de água-em-óleo consistindo de micro gotículas de uma solução supersaturada de oxidante dentro de uma matriz de óleo. O oxidante é normalmente o nitrato de amônio. Embalado em uma fina película de plástico, resistentes, cartuchos de emulsão tem um bom grau de rigidez e resistência à ruptura durante o manuseio normal, mas manter a capacidade de ruptura e propagação quando tampado.

Apêndice B: Estimativa dos fatores de intensidade de tensão

Problemas de fraturas em modo misto só podem ser resolvidos após calcular K_I e K_{II} , o que pode ser feito por elementos finitos a partir de três técnicas principais:

a) *Cálculo direto com base nos resultados de tensões e deslocamentos*

a.1) *Extrapolação dos deslocamentos*

Considerando o modo misto I-II, as componentes de deslocamentos u, v ao longo de qualquer direção radial a partir da ponta da fratura são analiticamente determinadas pela mecânica da fratura linear elástica, sob hipótese de meio elástico homogêneo e isotrópico, por

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{K_I}{4\mu} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \begin{bmatrix} (2\kappa - 1) \cdot \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \\ -(2\kappa + 1) \cdot \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{4\mu} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \begin{bmatrix} -(2\kappa - 1) \cdot \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \\ -(2\kappa + 1) \cdot \cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

com $\kappa = 3 - 4\nu$ para o estado plano de deformação.

Substituindo-se os valores numéricos das componentes de deslocamento calculadas à distância r ao longo da linha radial definida por θ , é possível então estudar-se a variação de K_I e K_{II} com a distância radial e extrapolar seus valores para a condição limite $r = 0$. Esta técnica permite estimativas do fator de intensidade de tensão empregando-se elementos finitos convencionais, em malha com grande refinamento, ou elementos finitos singulares.

a.2) *Correlação de deslocamentos (displacement correlation technique, DCT)*

Esta metodologia foi proposta por Shih et al. (1976), sendo geralmente, mas não obrigatoriamente, utilizada com elementos *quarter-point* singulares. A curva que descreve a abertura da fratura $\delta(r)^{\text{num}}$ pode ser calculada em função dos deslocamentos verticais computados nos nós $j-1$ e $j-2$ da Figura B.7.1 como:

$$\delta(r)^{num} = (4 \cdot v_{j-1} - v_{j-2}) \cdot \sqrt{\frac{r}{L}} \quad (B.2)$$

onde L é o comprimento do elemento ao longo da fratura.

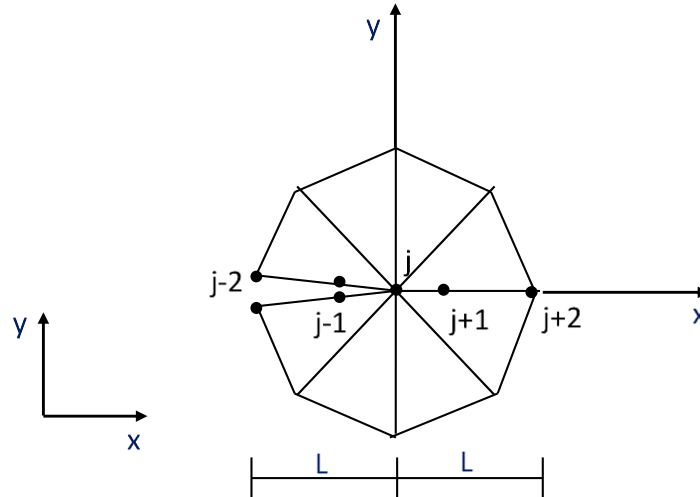


Figura B.7.1 - Roseta de elementos singulares na ponta da fratura (Araújo, 1999).

Para o modo I, a expressão analítica da abertura da fratura é dada na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) por:

$$\delta(r) = K_I \cdot \left(\frac{k+1}{\mu} \right) \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \quad (B.3)$$

Igualando-se as formulações numérica e analítica para a abertura da fratura, o fator de intensidade de tensão K_I pode ser estimado por:

$$K_I = \left(\frac{\mu}{\kappa+1} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{L}} \cdot (4 \cdot v_{j-1} - v_{j-2}) \quad (B.4)$$

Através de um procedimento similar, Araújo (1999) apresentou a expressão do fator de intensidade de tensão para o modo II,

$$K_{II} = \left(\frac{\mu}{\kappa+1} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{L}} \cdot (4 \cdot u_{j-1} - u_{j-2}) \quad (B.5)$$

onde u_{j-1} e u_{j-2} são os deslocamentos horizontais dos nós $j-1$ e $j-2$ do elemento triangular singular da Figura B.7.1.

Esta técnica é limitada para análise de fraturas em meios isotrópicos, em virtude desta hipótese (isotropia) haver sido implicitamente considerada no desenvolvimento da expressão analítica da abertura da fratura (Equação B.3).

b) Integral J computada num domínio equivalente em torno da fratura (*equivalent domain integral*, EDI)

Considere a trajetória de integração ilustrada na Figura B.7.2, compreendendo a ponta da fratura e com limites de integração correspondentes a pontos situados sobre as duas superfícies da fratura. Para estas condições, Rice (1968) demonstrou que a integral definida pela Equação (B.6), conhecida como integral J , é independente da trajetória de integração.

$$J = \oint_{\Gamma} S dy - \mathbf{t} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds \quad (\text{B.6})$$

onde S é a densidade de energia de deformação, \mathbf{t} o vetor de tensões em um plano definido pela normal exterior \mathbf{n} , \mathbf{u} o vetor de deslocamentos e ds o comprimento de um arco infinitesimal ao longo do contorno Γ . Para integração ao longo de um contorno que não contenha a ponta da fratura $J = 0$.

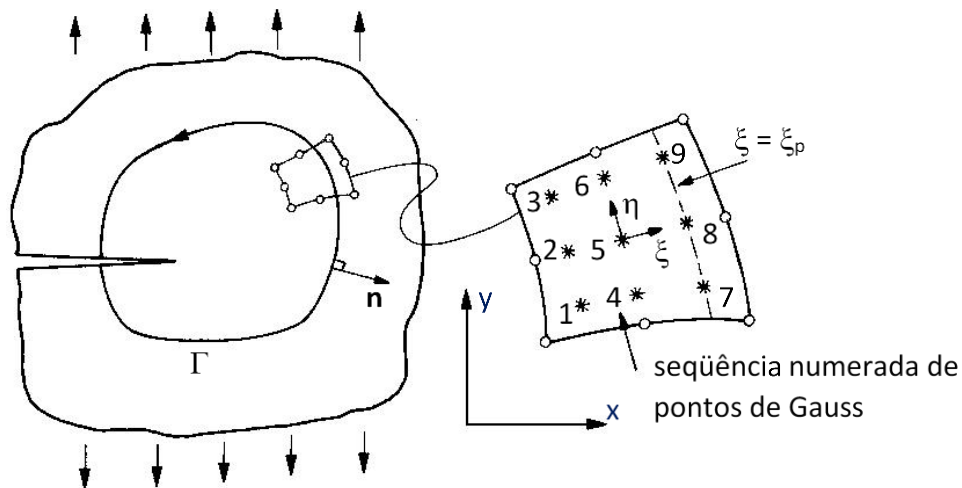


Figura B.7.2 - Trajetória para avaliação da integral J .

A integral J pode ser relacionada com os fatores de intensidade de tensão, já que na mecânica da fratura linear prova-se que, para cada modo de deformação,

$$J = G \quad (\text{B.7})$$

O que permite escrever os valores de K_I e K_{II} da sua relação G_I e G_{II} , que na MFLE é dada por:

$$K_I = \sqrt{\frac{8\mu J}{(\kappa + 1)}} \quad (\text{B.8a})$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{8\mu J}{(\kappa + 1)}} \quad (\text{B.8b})$$

Em aplicações do MEF, a integração da Equação (B.6) é feita por esquema de quadratura numérica através de todos os elementos finitos existentes ao longo de Γ (Owen e Fawkes, 1983). A utilização do método baseado na integral J tem a vantagem de que uma modelagem exata da singularidade na ponta da fratura não é necessária, pois a Equação (B.6), por ser independente da trajetória de integração, pode ser numericamente executada utilizando-se elementos finitos convencionais e em malhas com menor refinamento.

c) *Taxa de liberação de energia potencial*, obtida modificando a integral que estima as zonas plásticas fechando as pontas das fraturas (*modified crack-closure integral*, MCC).

O método da taxa de liberação de energia consiste basicamente na avaliação da energia de deformação em duas análises pelo MEF, considerando-se, na primeira, uma fratura com comprimento inicial a e, na segunda, uma fratura de comprimento final $a + \delta a$, resultante da propagação da fratura de um incremento virtual δa . A diferença da energia de deformação entre estas duas configurações é utilizada para estimativa da taxa de liberação de energia de deformação ($G = \delta U / \delta a$) que, por sua vez, é utilizada para avaliação dos fatores de intensidade de tensão.

Diversas variantes deste método de cálculo indireto de K_I e K_{II} foram propostas na literatura, dentre os quais o *método do fechamento de trinca modificado*, que é descrito a seguir.

O método do fechamento da fratura é baseado no conceito de que o trabalho executado para aumentar uma fratura de a para $a + \delta a$, sendo δa infinitesimal, é o mesmo necessário para fechar sua extremidade de $a + \delta a$ para a . Neste contexto, Irwin obteve a seguinte equação para a taxa de liberação de energia de deformação no modo I de deformação:

$$G = \lim_{\delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2 \cdot \delta a} \int_0^{\delta a} v(r) \cdot \sigma_y(r) \cdot dr \quad (\text{B.9})$$

onde δa é o crescimento virtual da fratura, σ_y a distribuição de tensão normal a uma distância r na frente da ponta da fratura (Figura B.7.3) e $v(r)$ o deslocamento de abertura da fratura, a uma distância r atrás da extremidade da nova ponta da fratura.

Para obtenção da Equação (B.9) nenhuma hipótese sobre o material é imposta, podendo ser usada tanto para materiais isotrópicos, quanto ortotrópicos ou anisotrópicos. A taxa de liberação de energia é avaliada considerando apenas o trabalho realizado pelas tensões sobre os deslocamentos produzidos pelo aumento virtual da fratura (Araújo, 1999).

Raju (1987) propôs o *método de fechamento da trinca modificado* baseado nas seguintes premissas:

- A distribuição dos elementos finitos nas vizinhanças da ponta da trinca é simétrica em relação aos eixos locais x e y (Figura B.7.1);
- Ao longo do eixo x , as distribuições de tensão normal e cisalhante seguem as distribuições teóricas com singularidade do tipo $1/\sqrt{r}$;
- A forma funcional dos deslocamentos de abertura da trinca, $u(r)$ e $v(r)$, é determinada pelas funções de interpolação adotadas no elemento finito.

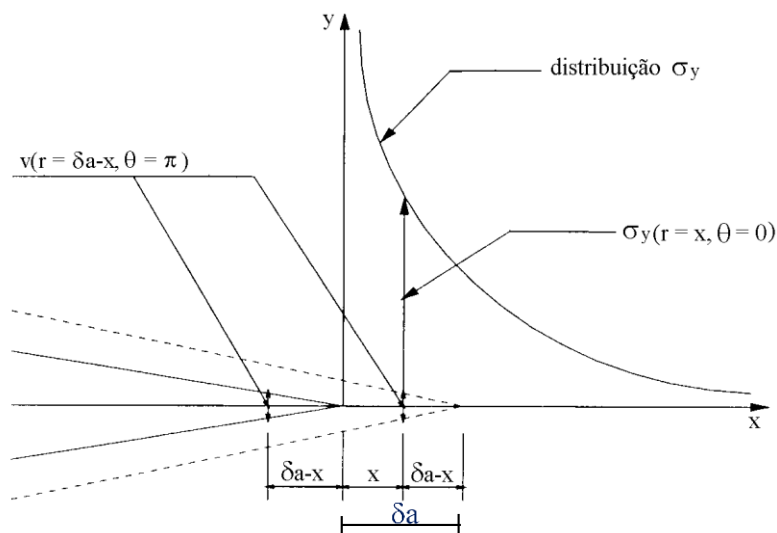


Figura B.7.3 - Distribuição da tensão normal na frente da trinca e do deslocamento de abertura atrás da trinca (Araújo, 1999).

Quando um corpo fraturado está submetido a modos de deformação isolados (I ou II) os deslocamentos das faces da fratura são simétricos em relação ao eixo x , isto é, o trabalho realizado para fechar uma face da fratura de $a + \delta a$ para a é igual ao trabalho realizado para fechar a face oposta. No caso de modo misto de deformação I-II, as faces superior e inferior da fratura não se deslocam simetricamente (ou antissimetricamente) e, nesta condição, o trabalho realizado para fechar a face superior é diferente daquele necessário para fechar a face inferior.

Para o elemento triangular singular (*quarter-point*) utilizado por Lima (2001), as taxas de liberação de energia de deformação nos modos I e II podem ser calculadas como (Raju, 1987):

$$G_I = -\frac{1}{2 \cdot \delta a} \left\{ \begin{array}{l} F_{y_i} \cdot [t_{11}(v_m - v_{m'}) + t_{12}(v_l - v_{l'})] + \\ F_{y_j} \cdot [t_{21}(v_m - v_{m'}) + t_{22}(v_l - v_{l'})] \end{array} \right\} \quad (\text{B.10a})$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2 \cdot \delta a} \left\{ \begin{array}{l} F_{x_i} \cdot [t_{11}(u_m - u_{m'}) + t_{12}(u_l - u_{l'})] + \\ F_{x_j} \cdot [t_{21}(u_m - u_{m'}) + t_{22}(u_l - u_{l'})] \end{array} \right\} \quad (\text{B.10b})$$

onde F_{x_i} e F_{x_j} (ou F_{y_i} e F_{y_j}) são forças nodais aplicadas nos nós i e j , respectivamente,

$t_{11} = 6 - 3\frac{\pi}{2}$, $t_{12} = 6\pi - 20$, $t_{21} = \frac{1}{2}$ e $t_{22} = 1$. No elemento da Figura B.7.4, note

que a força no nó i é a soma das contribuições dos elementos 1, 2, 3 e 4, enquanto que a força no nó j é determinada com base apenas na contribuição do elemento 4.

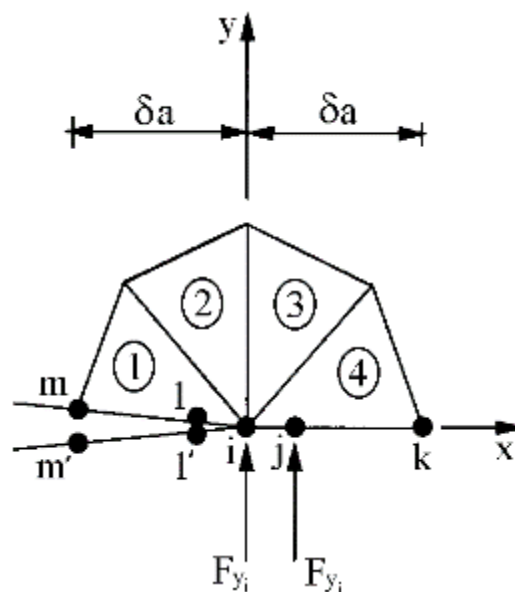


Figura B.7.4 - Forças nodais aplicadas nos elementos triangulares singulares (Araújo, 1999).

As equações (B.11a) e (B.11b) são válidas para os modos de deformação I, II e misto I-II. Raju (1987.) também apresentou uma formulação para cálculo da taxa de liberação de energia de deformação considerando a aplicação de 3 forças nodais por elemento (formulação consistente) em vez das 2 forças nodais por elemento (formulação simplificada) aqui apresentada. Segundo Raju (1987), a formulação simplificada, além de ser mais fácil de ser implementada em aplicações numéricas, produz resultados de maior precisão.