

Modelação computacional do mecanismo de inicio da fissuração de um solo reforçado com fibras com a aplicação de uma lei constitutiva elastoplastica com dano continuo.

Rubén Alcides López Santacruz

Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, rlopez@ing.una.py

Nilo Cesar Consoli

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

Fulgencio Antonio Aquino Duarte

Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, aaquino@ing.una.py

RESUMO: O solo reforçado com fibras distribuídas aleatoriamente é um geomaterial estudado de forma científica e sistematizada nas últimas décadas, com várias pesquisas a nível internacional que concluem que as fibras melhoram várias das propriedades mecânicas e alteram o mecanismo de falha do material. Paralelamente, na mecânica computacional foi desenvolvida a teoria da mecânica de dano contínuo e as contribuições de muitos pesquisadores possibilitaram numerosas aplicações no campo da engenharia prática, em especial, no campo dos materiais compósitos e geomateriais. Na engenharia geotécnica foram publicadas as primeiras propostas de modelos constitutivos para solos granulares e para solos coesivos. Neste trabalho é apresentada a aplicação de uma lei constitutiva elastoplastica com dano contínuo desenvolvida em conjunto pela UNA e pela UFRGS, na modelação computacional de uma fundação utilizando solos reforçados com fibras, que foi implementada através de ferramentas computacionais que utilizam código de elementos finitos. Para a obtenção dos parâmetros e calibração do modelo, serão utilizados dados de ensaios experimentais obtidos na literatura e os ensaios desenvolvidos pelo grupo de pesquisa da UFRGS. O modelo foi codificado na linguagem de programação FORTRAN e posteriormente inserido numa subrotina UMAT do software ABAQUS. Com base nos trabalhos desenvolvidos é possível concluir que: a teoria da Mecânica de Dano Contínuo é aplicável no estudo do comportamento no estado elastoplástico com dano dos solos reforçados com fibras; que a medida do dano do material está baseado na variação do módulo elástico do mesmo, e também que a lei constitutiva elastoplástica com dano desenvolvida baseada na hipótese de deformação equivalente entre as configurações com dano e efetiva, demonstrou sua aplicabilidade para modelar o fenômeno associado a projetos geotécnicos

PALAVRAS-CHAVE: Solos reforçados com fibras, Modelação computacional, Mecânica do dano continuo, Lei constitutiva, Abaqus.

1 INTRODUÇÃO

A geomecânica computacional está apresentando nos últimos anos avanços significativos com o desenvolvimento de modernas técnicas computacionais que possibilitam a análise de problemas muito complexos da engenharia geotécnica. Esta

tendência motivou o desenvolvimento de softwares específicos aplicados a geomateriais e projetos geotécnicos. O desenvolvimento de modelos constitutivos, que permitam a caracterização numérica e modelação computacional para os novos materiais geotécnicos, constitui um desafio permanente na geomecânica computacional. Neste sentido,

o solo reforçado com fibras distribuídas aleatoriamente é um geomaterial estudado de forma científica e sistematizada nas últimas décadas, com várias pesquisas a nível internacional que concluem que as fibras melhoram várias das propriedades mecânicas e alteram o mecanismo de falha do material. Paralelamente, na mecânica computacional foi desenvolvida a teoria da mecânica de dano contínuo e as contribuições de muitos pesquisadores possibilitaram numerosas aplicações no campo da engenharia prática, em especial, no campo dos materiais compósitos e geomateriais. Na engenharia geotécnica foram publicadas as primeiras propostas de modelos constitutivos para solos granulares e para solos coesivos. Neste trabalho é apresentada a aplicação de uma lei constitutiva elastoplástica com dano contínuo na modelação computacional de uma fundação utilizando solos reforçados com fibras, que foi implementada através de ferramentas computacionais que utilizam código de elementos finitos.

2 SOLOS REFORCADOS COM FIBRAS

2.1. Comportamento mecânico

Os solos reforçados com fibras, a pesar de ser um geomaterial utilizado desde as primeiras civilizações, foi estudado de forma científica e sistematizada nas últimas décadas, com várias pesquisas realizadas a nível internacional, principalmente em forma experimental no laboratório e também em ensaios de campo (e.g.: Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Maher & Gray, 1990; Shewgbridge & Sitar, 1990; Morel & Gourc, 1997; Ulbrich, 1997; Montardo, 1999; Consoli et al., 1997, 1998, 1999, 2002, 2003; Feuerharmel, 2000; Specht, 2000; Casagrande, 2001, 2005; Santos, 2008, Heineck et al., 2005). Todas as pesquisas consensuam que, as fibras melhoram muitas das propriedades mecânicas do solo, e também mudam algumas das suas características principais. Entre as principais melhorias no desempenho mecânico produzidas pela adição da fibra no solo estão: o aumento da sua

resistência ao corte mantendo sua isotropia e a redução da perda de resistência depois de atingir o pico. A mudança principal do comportamento do solo é a transformação de um material de rotura frágil a um material de características de rotura dúctil, o que ajuda enormemente a não ter falhas repentinas que não permitam medidas de mitigação antes do colapso.

O estudo deste geomaterial está baseado principalmente em ensaios experimentais, com poucos estudos de caracterização numérica e desenvolvimento de seus modelos constitutivos que permitam a utilização de ferramentas computacionais com resultados mais aproximados ao comportamento real do solo reforçado com fibras.

Paralelamente nas últimas décadas, na mecânica computacional foi desenvolvida a teoria da Mecânica de Dano Contínuo, desde a sua primeira formulação pelo (Kachanov, 1958) e as posteriores contribuições no desenvolvimento da teoria realizados por (Murakami & Ohno, 1958), (Simo and Ju, 1987 a), (Chaboche, 1995), (Cordebois et al, 1979), (Ju, 1989), (Krajcinovic and Fonseka, 1981), (La Borderie et al, 1990) possibilitaram numerosas aplicações no campo da engenharia prática, em especial, no campo dos materiais compostos (Chaboche et al, 1995), (Voyiadjis et al, 2000) e geomateriais (Mazars & Pijaudier-Cabot, 1989). Na engenharia geotécnica foram publicadas recentemente as primeiras propostas de modelos constitutivos com dano para solos granulares e para solos coesivos, como os realizados por (Al-Shayea, N. & Mohib, 2011), y (Al-Shayea, N. & Mohib, K., 2012).

O desenvolvimento de modelos constitutivos, que permitam a sua caracterização numérica e modelação computacional para os novos materiais geotécnicos que são desenvolvidos em práticas de laboratório e ensaios de campo, constituem um desafio permanente para a geomecânica computacional. Neste trabalho é apresentado os resultados da implementação de uma lei constitutiva elastoplástica com a incorporação da teoria da Mecânica de Dano

Contínuo no software ABAQUS que utiliza código do Método de Elementos Finitos.

3 MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO

O sentido mecânico do dano em materiais sólidos é a criação e crescimento de micro-vazios ou micro-fissuras, que são descontinuidades num meio que é considerado como contínuo a uma escala macro (Lemaitre & Desmorat, 2005).

O dano de um material é o processo físico progressivo pelo qual o mesmo chega posteriormente à rotura. A mecânica do dano é o estudo por meio de variáveis mecânicas, dos mecanismos envolvidos na degradação de materiais, quando estão sujeitos a cargas. Na microescala é a acumulação de microtensões nas proximidades de defeitos ou interfaces e a rotura de ligações, que degradam ao material. Na mesoescala do volume representativo resulta no crescimento e interligação de microfissuras e microporos, que juntos, iniciam uma fissura. Na macroescala o dano é representado pelo crescimento da referida fissura. Os dois primeiros níveis podem ser estudados por meio das variáveis da Mecânica de Meios Contínuos definida a nível de mesoescala. O terceiro nível é geralmente estudada usando a Mecânica da Fratura com variáveis definidas a nível macroscópico.

A Mecânica do Dano Contínuo em contraste com a Mecânica da Fratura, que considera o processo de iniciação e crescimento de microfissuras como um processo descontínuo, a Mecânica de Dano Contínuo utiliza variáveis contínuas relacionadas com a densidade desses defeitos para descrever a deterioração do material antes do início de macrofissuras.

4 LEI CONSTITUTIVA ELASTOPLÁSTICA COM DANO CONTÍNUO PARA SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Na formulação da lei constitutiva são utilizados os fundamentos da Mecânica dos Meios Contínuos e a Mecânica do Dano Contínuo.

Para a incorporação do dano foi utilizada uma lei constitutiva desenvolvida baseada na hipótese de deformação equivalente entre as configurações com dano e efetiva (López, 2016). O algoritmo para a lei constitutiva foi codificada na linguagem de programação FORTRAN e implementada no software ABAQUS.

4 MODELACAO COMPUTACIONAL DE UM ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Nesta secção são apresentados os resultados da aplicação da lei constitutiva desenvolvida nos resultados de um ensaio de arrancamento aplicado a solos reforçados com fibras encontrado na literatura (Consoli et. al. 2012).

O ensaio de arrancamento modelado foi realizado com uma placa de aço embebida em areia reforçada com fibra para um valor de $H/D=1,5$.

Para o caso do enchimento com areia e fibra são utilizados dois tipos de solo: o solo natural e o solo reforçado com fibras, como é mostrada na figura 1.

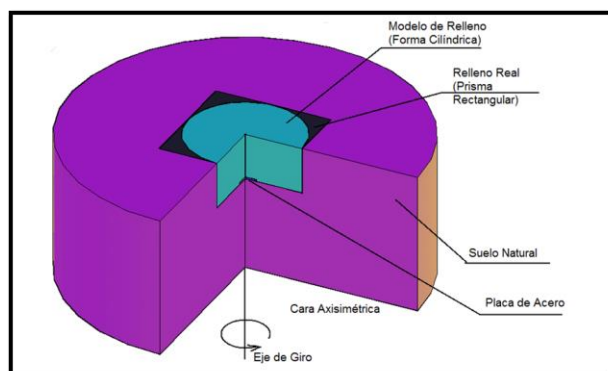


Figura 1. Esquema do Modelo de Simulação para o Solo Reforçado com Fibras Título.

Placa e cabo de aço: uma placa circular de aço de 30cm de diâmetro y 1" de espessura unida a um cabo de aço vertical. A placa tem uma profundidade de fundação de -0.45m para a relação $H/D=1.5$.

Solo natural: volume cilíndrico de areia, de 4,5m de diâmetro, com um nível de 0,60m por cima do nível superior da placa, e 1,8m por baixo do mesmo.

Areia reforçada com fibra: volume cilíndrico de areia e fibra, de 1,5m de diâmetro e altura de 0,45m para a relação de $H/D=1.5$.

4.1. Propriedades dos materiais

Placa e cabo de aço:

Material elástico

Módulo de Elasticidade **E**: 200 GPa

Coeficiente de Poisson **v**: 0.3

Densidade: 7850 kg/m³

Solo Natural e Solo com Fibra:

Material Elasto-Plástico

Lei Constitutiva: Drucker Prager Hardening

Tabela 4.1 Parâmetros utilizados

Parte Elástica		
	Solo Natural	Solo com Fibras
Densidade	1770 kg/m ³	1770 kg/m ³
Módulo de Elasticidade, E	45 MPa	61,54 MPa
Coeficiente de Poisson, v	0.3	0.3
Parte Plástica		
Ângulo de Fricção Φ	36,7°	53°
Taxa de tensão de fluência para ensaio triaxial (Flow stress ratio)	1	1
Angulo de Dilatancia Ψ	10°	53°
Tensão de Fluência σ	7.000 Pa	7500 Pa

4.2. Condições de contorno

As condições de contorno consistem em fixações nos eixos perpendiculares no lado escolhido, no eixo axisimétrico, na parte inferior e a parte lateral do modelo

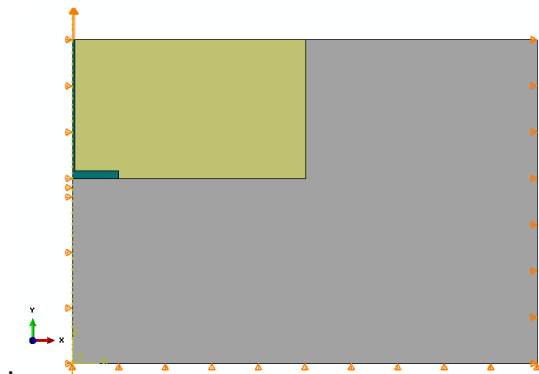


Figura 2. Condições de contorno do modelo axisimétrico. .

4.3. Contato

Define-se o contato entre a placa de aço e solo, sendo a superfície master a placa e o escravo o solo.

O comportamento tangencial consiste numa lei de fricção de Coulomb com coeficiente de atrito de 0,2, direccionalidade isotrópica, e a formulação utilizada é penalidade pura.

Em quanto ao comportamento normal, a força normal de contato actúa si existe penetração entre os corpos e permite a separação entre as superfícies. Nesta direcção também é utilizado um algoritmo baseado na penalidade pura.

4.4. Família de Elementos e Malha

Placa e Cabo de Aço: Contínuo, axisimétrico, de 8 nós, quadrilátero, bi-quadrático.

Solo de Fundação: Continuo, axisimétrico, de 8 nós, quadrilátero, bi-quadrático.

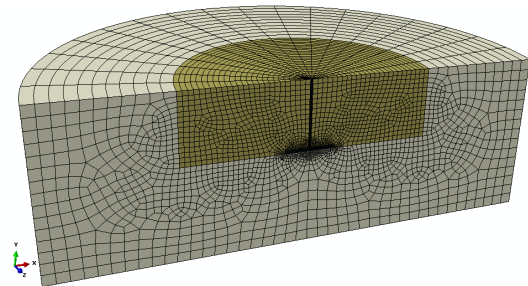


Figura 3. Malhado do conjunto.

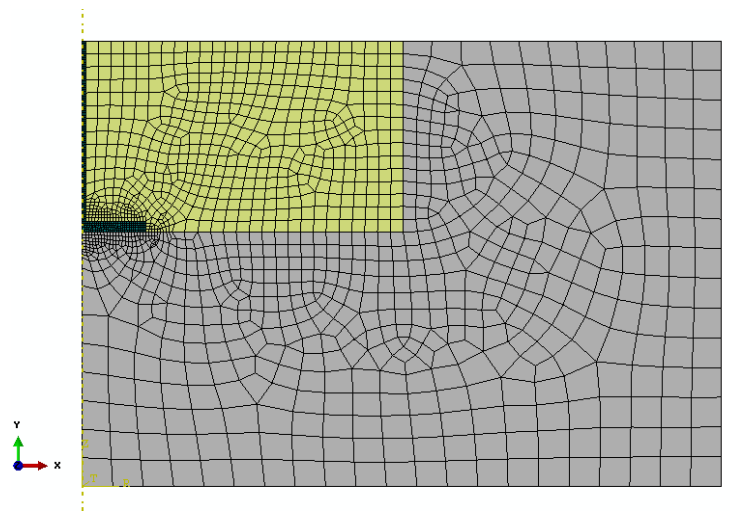


Figura 4. Outra vista do malhado do conjunto.

4.5. Resultados da simulacao do arrancamento

4.5.1. Deslocamento total do solo de fundação

Os máximos deslocamentos observam-se no solo localizado por cima da cara superior da placa de aço, estes deslocamentos diminuem na forma mostrada na figura, sobre a placa em forma de óvalo e a medida que se afastam do eixo de simetria formando ângulos diferentes em relação à vertical.

No ensaio de campo observou-se que a superfície de falha determinada é um cone com sua geratriz formando um ângulo de 30 ° com a vertical. (N. C. Consoli, C. A. Ruver, V. Girardello, L. Festugato & A. Thomé, 2012). Neste caso a simulação foi realizada com elementos continuos, motivo pelo qual o sólido não sofreu fratura. No entanto, o gradiente (de transição) de deslocamento indica a localização da superfície de fractura possível, este ângulo é de aproximadamente 30 graus a partir da vertical.

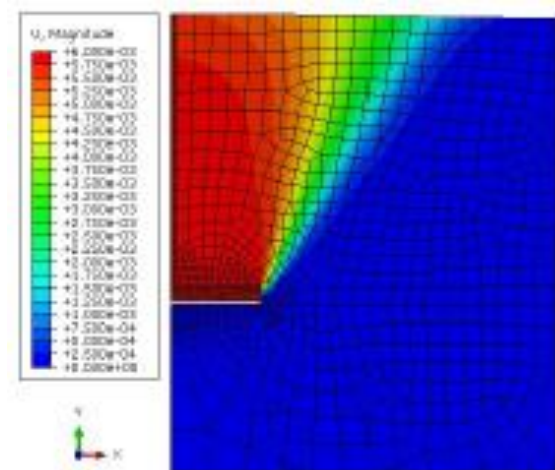


Figura 5. Deslocamento no Solo de fundação.

4.5.2. Deformações plásticas PEEQ

A deformação plástica equivalente (Peeq) é uma variável escalar usada para representar a deformação inelástica do material. Quando a variável é maior do que zero, significa que o material tenha atingido a fluência. A área azul indica que o material tem ainda um comportamento

elástico. (ABAQUS 6.10) As figuras seguintes mostram que a plastificação em todos os casos está concentrada nos elementos pertos do canto superior da placa e segue o caminho da superfície da fratura observada experimentalmente, ou seja, mesmo se esta simulação não permite a fratura dos elementos, pode prever onde vai acontecer a ruptura, e coincide com o caso experimental.

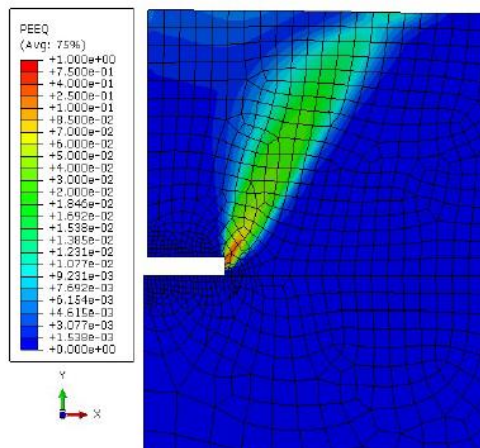


Figura 6. Deformação plástica equivalente. (PEEQ)

4.5.3. Resultados obtidos com a incorporação da lei constitutiva com dano.

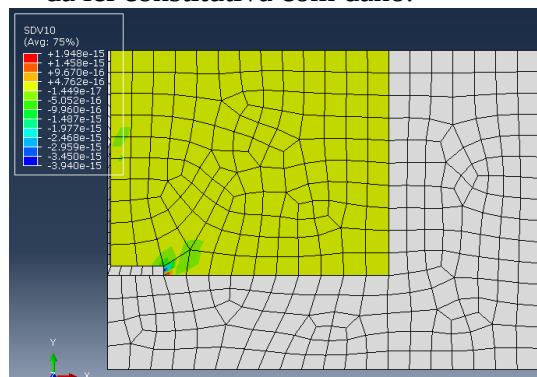


Figura 7 Dano do material

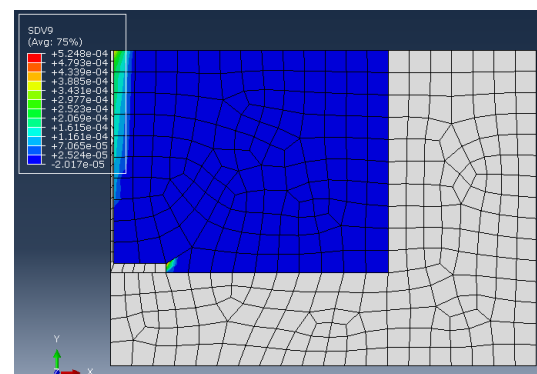


Figura 8 Deformação plástica

Estes resultados contribuem para aprofundar o conhecimento em relação aos parâmetros e variáveis que caracterizam o mecanismo de fissuração dos solos melhorados com fibras. Também é possível concluir que: a teoria da Mecânica de Dano Contínuo é aplicável no estudo do comportamento no estado elastoplástico com dano dos solos reforçados com fibras; a lei constitutiva elastoplástica com dano utilizada baseada na hipótese de deformação equivalente entre as configurações com dano e **efetiva**, demonstraram sua aplicabilidade para modelar o fenômeno associado a projetos geotécnicos.

A linguagem de programação FORTRAN permite a codificação da lei constitutiva desenvolvida para sua implementação computacional em softwares baseadas no Método dos Elementos Finitos.

A sub-rotina UMAT do software ABAQUS® permite a possibilidade de implementar a lei constitutiva de novos materiais geotécnicos, que normalmente não são encontrados nos softwares comerciais que utilizam o Método dos Elementos Finitos aplicáveis a projetos geotécnicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte recebido do CONACYT (Conselho Nacional de Ciencia e Tecnologia) do Paraguai, para que este projeto fosse desenvolvido em parceria pela UNA (Universidad Nacional de Asunción) e a UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

REFERÊNCIAS

- Al-Shayea, N. & Mohib, K., (2011) Parameters for an Elasto-Plasto-Damage Model for the Stress-Strain Behavior of Dense Sand. *International Journal of Damage Mechanics*.
- Al-Shayea, N. & Mohib, K., (2012) Parameters for an Elasto-Plasto-Damage Model for the Stress Behavior of Cohesive Soils. *International Journal of Damage Mechanics*.
- Al-Refeai, T.O. (1991) Behaviour of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, 10(4), 319-333
- Casagrande, M.D.T. (2001) Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Porto Alegre, 2001. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS
- Casagrande, M.D.T. (2005) Comportamento solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Porto Alegre, 2005. 217p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS
- Chaboche, J. L. (1990). Continuum Damage Mechanics: Part I: General Concepts and Part II: Damage Growth, Crack Initiation and Crack Growth. *J. Appl. Mech.*, 55, 59-72.
- Chaboche, J.L.(1995), A Continuum Damage Theory with Anisotropic and Unilateral Damage, *La Recherche Aéropatiale*, n.2, 139-147.
- Consoli, N.C., Ulbrich, L.A. & Prietto, P.D.M. Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, p. 481-486, 1997
- Consoli, N.C., Prietto, P.D.M. & Ulbrich, L.A. (1998). Influence of fibre and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(1), 95-101
- Consoli, N.C., Prietto, P.D.M. & Ulbrich, L.A. (1999). The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. *Ground Improvement*, ISSMGE, v.3 n.3, p. 21-30, 1999
- Consoli, N.C., Montardo, J.P., Prietto, P.D.M. & Pasa, G. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v. 128, n. 6, p. 462-472.
- Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A. & Prietto, P.D.M. (2003a). Behaviour of plate load tests on soil layers improved with cement and fibre. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(1), 95-101
- Consoli, N.C., Casagrande, M.D.T., Prietto, P.D.M. & Thome, A. (2003b) Plate load test on fibre-reinforced soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(10), 951-955
- Consoli, N.C., Ruver, C.A., Girardello, V., Festugato, L. & Thome, A. (2012) Effect of polypropylene fibers on the uplift behavior of model footings embedded in sand. *Journal of Geosynthetics International*, Volume 18, Issue 1, 79-84
- Cordebois, J. P. & Siridoff, F. (1979), Damage-Induced Elastic Anisotropy, in *Mechanical Behavior of Anisotropic Solids*, Colloque Euromech 115 (J.P. Boehler, Ed., Villard de Lans, Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, 761-774.

- Gray, D.H. & Ohashi, H. (1983) Mechanics of fibre reinforcing in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 109(3): 335-353
- Gray, D.H. & Al-Refeai, T. (1986) Behaviour of fabric-versus fibre reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(8): 804-820
- Heineck, K.S., Coop, M. R., & Consoli, N.C. (2005) Effect of micro-reinforcement of soils from very small to large shear strains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.131.
- Ju, J. W. (1989) On energy-based coupled elastoplastic damage theories: constitutive modeling and computational aspects, *International Journal of Solid Structures* Vol.25, No.7 803-833.
- Kachanov, L. M. (1958), Time of the rupture process under creep conditions. *IVZ Akad Nauk - S.S.R. - Otd Tech Nauk* 8.
- Krajcinovic, D. & Fonseka, U. (1981), The Continuous Damage Theory of Brittle Materials, Part I and II, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.48, 809-824.
- La Borderie, C., Berthaud, I. & Pijaudier-Cabot, G (1990), Crack Closure Effects in Continuum Damage Mechanics. Numerical Implementation. In *Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures* (Edited by Bicanic and H. Mang), Pineridge Press, Zell-am-See, 975-986.
- Lemaitre, J. & Desmorat, R. (2005). *Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. 2005, Springer.
- Maher, M.H. & Gray, D.H. (1990). Static response of sand reinforced with randomly distributed fibres. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116(11), 1661-1677
- Mazars, J. & Pijaudier-Cabot, G. (1989), Continuum Damage Theory – application to concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE 115, 354-365.
- Montardo, J.P. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituinte. Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS
- Morel, J.C. & Gourc, J.P. (1997). Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. *Geosynthetics International*, Minnesota, v.4, n.5, p. 481-508.
- Murakami, S., Ohno, N. (1980), A Continuum Theory of Creep and Creep Damage, 3^o IUTAM Symposium on Creep in Structure.
- Santos, A.P.S. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral. Porto Alegre, 2004. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS
- Simo, C. & Ju, J. (1987), Stress and Strain Based Continuum Damage Models: I. Formulation. *International Journal of Solids and Structures*, 23,821-840.
- Shewbridge, E. & Sitar, N. (1989). Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v. 115, n.8, p. 1134-1147.
- Ulbrich, L.A. Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras. Porto Alegre, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS
- Voyiadjis, G.Z. & Deliktas, B. (2000), A Coupled Anisotropic Damage Model for the Inelastic Response of Composite Materials, *Computational Methods and Applied Mechanical Engineering*. 183, 159-199.