

## 4 Verificação dos modelos constitutivos

Neste capítulo são apresentadas algumas simulações numéricas de ensaios triaxiais convencionais (CTC) com a finalidade de verificar as implementações computacionais realizadas no programa ANLOG no que diz respeito aos modelos constitutivos: Hiperbólico, Mohr-Coulomb Modificado, Lade-Kim. Estes modelos foram testados nas versões anteriores do ANLOG (Nogueira (1998), Oliveira (2006)) sob condição axissimétrica. Os resultados das simulações numéricas realizadas com o ANLOG 3D são comparados com a solução analítica obtida integrando-se diretamente a equação constitutiva ao longo de uma trajetória de deformação conhecida.

Desta maneira, para um conjunto de parâmetros, se procura verificar a capacidade do programa ANLOG 3D em prever o comportamento tensão-deformação de cada modelo proposto tal como são adotados nas formulações.

Os resultados numéricos foram obtidos, a nível global, adotando-se o procedimento incremental iterativo de Newton-Rhapson Modificado, com incrementos automáticos de carga proposto por Crisfiel (1981) e descrito por Nogueira (1998). Como critério de convergência, foi adotada a relação entre a norma euclidiana do vetor de forças desequilibradas na interação corrente e a norma euclidiana do vetor de força externa.

A malha de elementos finitos adotada, constituída por 60 elementos C20 (elemento isoparamétrico de 20 nós) e 389 pontos nodais e considerando a simetria do problema, é apresentada na Figura 4.1.

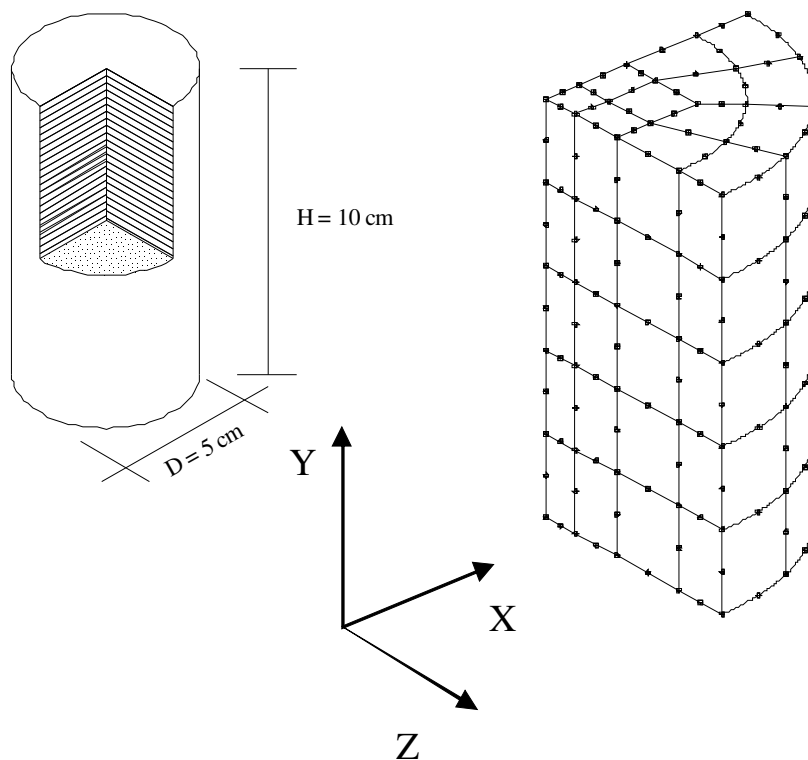


Figura 4.1 – Simulação de ensaios CTC malha 3D de elementos finitos

As seguintes condições de contorno foram adotadas: os planos XZ (na base), XY e YZ são impedidos de se movimentarem na direção perpendicular as mesmas, com isso as arestas X e Y para  $Y=0$ , assim como a aresta Y para  $X=Z=0$ , são impedidos de se movimentarem em duas direções perpendiculares, e o ponto  $X=Y=Z=0$ , tem restrição nos três eixos.

Um estado de tensão inicial isotrópico é definido em todos os pontos de Gauss através do macro-comando TINIS a fim de simular a fase de compressão isotrópica do ensaio CTC.

A fase do cisalhamento pode ser simulada por duas maneiras: a) carregamento controlado, em que um carregamento normal uniformemente distribuído e de intensidade  $\Delta Q$  é aplicado no topo da amostra usando o macro comando CEDGE (ver Figura 4.2a); b) deslocamento controlado, em que um deslocamento prescrito  $\delta$  na direção vertical nos nós do topo da amostra (ver Figura 4.2b) usando o macro comando CCPRES. Uma das vantagens do controle de deslocamento é a possibilidade de se capturar o comportamento pós pico, o que não é possível de se verificar com o controle de carga quando se adota o método de Newton Raphson.

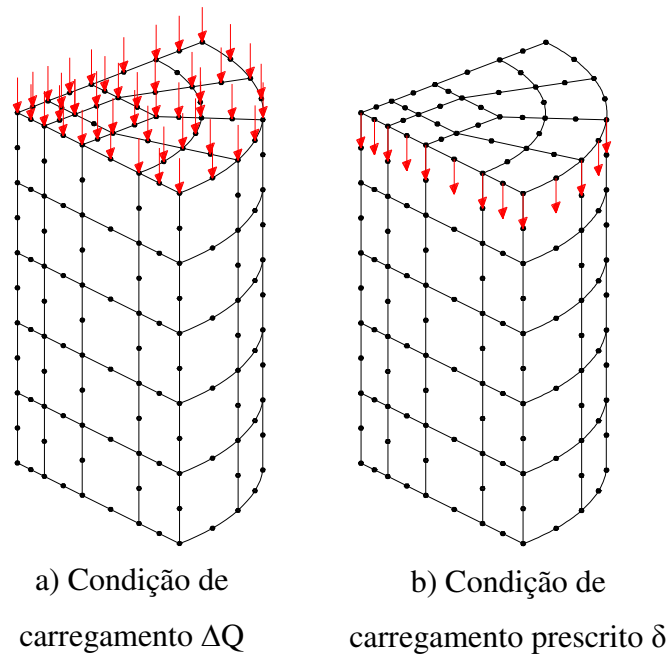


Figura 4.2 – Carregamento da malha para a simulação da fase de cisalhamento

Para a análise de cada um dos modelos constitutivos descritos neste capítulo, foi empregada a mesma malha, mudando só as características do material por cada modelo e os níveis de carregamento aplicado.

#### 4.1. Modelo Hiperbólico ( $\nu = \text{cte.}$ )

Os parâmetros utilizados na verificação da implementação do Modelo Hiperbólico, considerando o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) constante são apresentados na tabela 4.1 juntamente com os níveis de tensão de confinamento, esses parâmetros foram extraídos do trabalho de Duncan e Chang (1970).

Os resultados numéricos obtidos através do ANLOG 3D foram determinadas aplicando-se um deslocamento prescrito de 4mm., no topo da malha de elementos finitos como apresentado na Figura 4.2a, e também condições de carregamento  $\Delta Q$  como mostrado na Figura 4.2b. Como mencionado anteriormente, a simulação com deslocamento prescrito permite obter o comportamento pós-pico, mostrado na Figura 4.3.

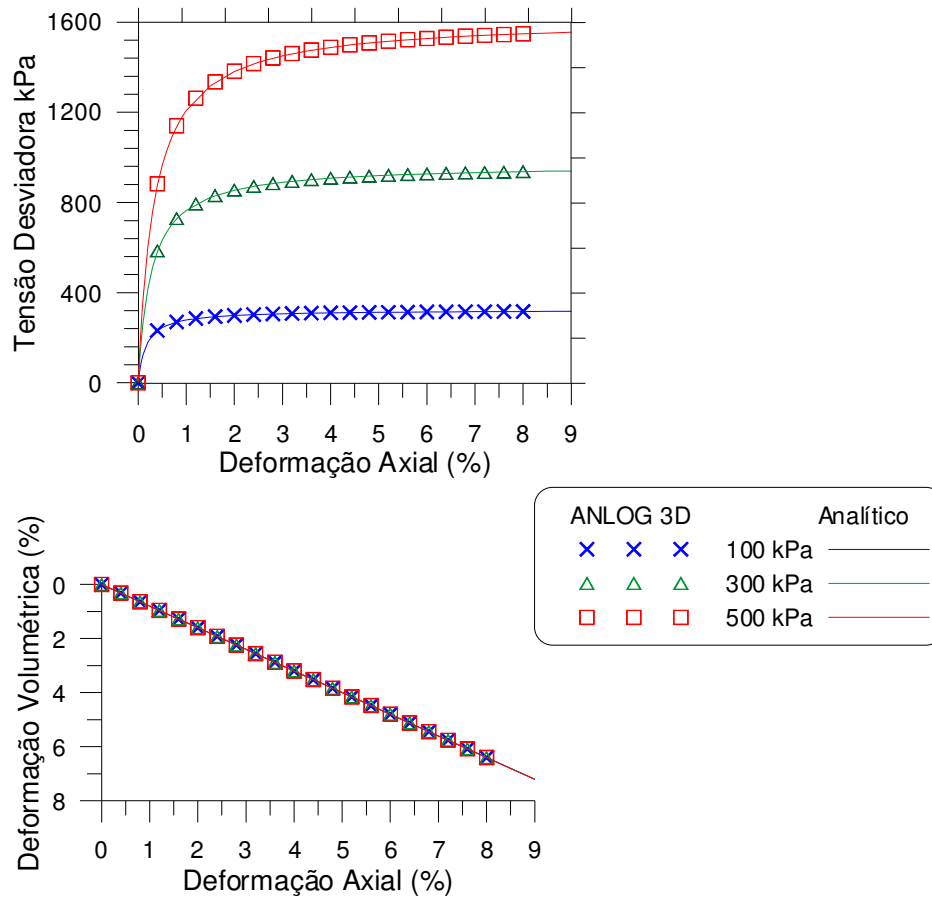


Figura 4.3 – Simulação de ensaios CTC modelo Hiperbólico ( $v = cte$ ).

Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo Hiperbólico ( $v = cte$ ) Duncan e Chang (1970), tensão inicial isotrópico e carregamento axial.

| Parâmetros          |                     | $\sigma_3$ (kPa) | $\Delta Q$ (kPa) |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| $K = 2000$          | $v = 0,1$           | 100              | 350              |
| $K_{ur} = 2120$     | $c = 0,0$ kPa       | 300              | 990              |
| $n = 0,54$          | $\phi = 36,5^\circ$ | 500              | 1550             |
| $P_{atm} = 101,325$ | $R_f = 0,91$        |                  |                  |

As curvas tensão-deformação obtidas tanto pelo ANLOG 3D e pela solução analítica são apresentadas na Figura 4.3, indicando uma boa concordância entre os resultados. Cabe observar aqui que as curvas deformação axial versus deformação volumétrica apresentadas na Figura 4.3, fornecidas pela análise numérica e analítica estão sobrepostas. Isto se deve ao fato deste modelo de não considerar a variação da deformação volumétrica com a tensão de confinamento.

## 4.2. Modelo Hiperbolico (B = cte)

Os parâmetros adotados para avaliar o Modelo Hiperbólico, com B constante, e os dados de simulação dos ensaios CTC são apresentados na tabela 4.2. Estes parâmetros foram obtidos a partir de ensaios de compressão triaxial convencional realizados com amostras de areia, denominados ‘Boulder Sand’, realizado por Azevedo (1980), e avaliados na formulação do modelo na versão 2D do ANLOG por Nogueira (1998).

Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo Hiperbólico (B = cte) “Boulder Sand” (Azevedo 1983)

| Parâmetros     |                     | $\sigma_3$ (kPa) | $\Delta Q$ (kPa) |
|----------------|---------------------|------------------|------------------|
| K = 342        | M = 0,45            | 17.2             | 47,6             |
| $K_{ur} = 370$ | c = 2,8 kPa         | 51.7             | 120,0            |
| n = 0,43       | $\phi = 31,0^\circ$ | 86.2             | 191,0            |
| Patm = 150     | $R_f = 0,91$        |                  |                  |

Na tabela 4.2 são apresentadas as tensões de confinamento isotrópico  $\sigma_3$ , assim como o nível de tensão pico na ruptura. Para a etapa de cisalhamento através do ANLOG 3D, foram consideradas um deslocamento prescrito de 4mm para os três estados de confinamento.

Os resultados obtidos do comportamento tensão-deformação usando o Modelo Hiperbólico B=cte, através do ANLOG 3D e apresentado na Figura 4.4, pode-se observar tanto as soluções analíticas enquanto as soluções numéricas são concordantes.

Os resultados da deformação volumétrica e deformação axial, obtido através do Modelo Hiperbólico com B=cte, apresentam um comportamento não linear, sendo que a variação da deformação volumétrica nas proximidades da ruptura tende a zero, além disso, fornecem valores diferentes para cada variação da tensão de confinamento.

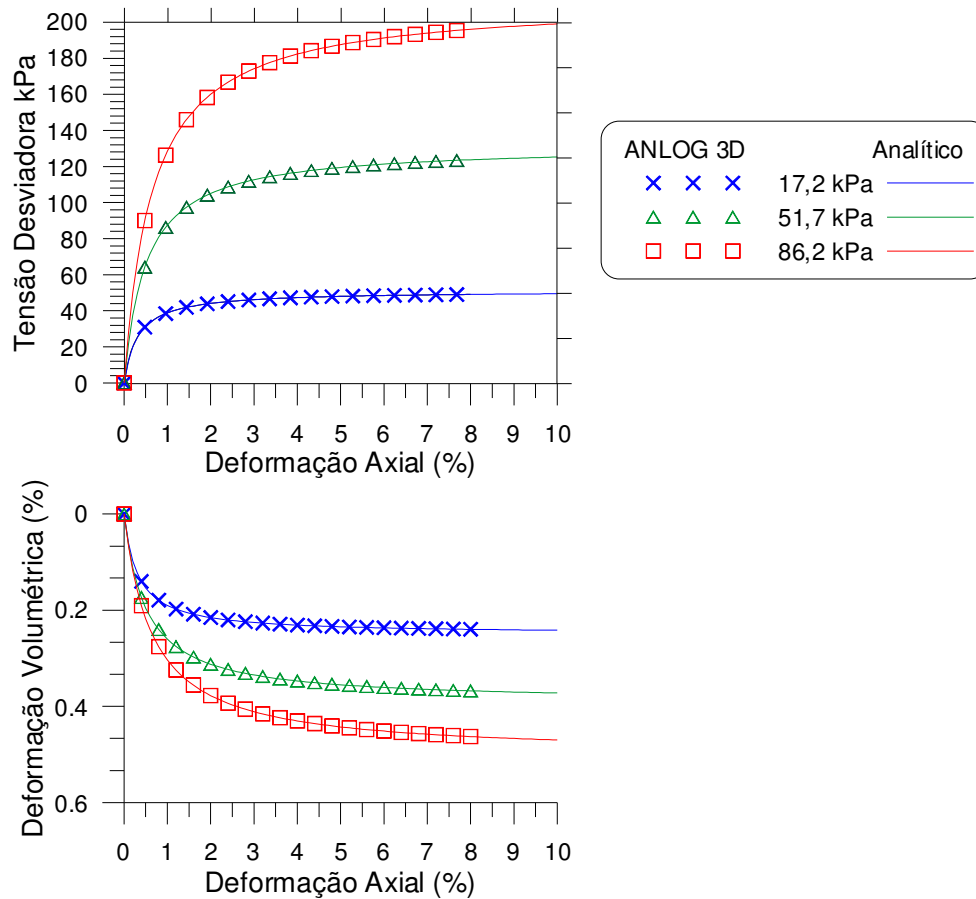


Figura 4.4 – Simulação dos ensaios CTC Modelo Hiperbolico ( $B = cte$ ) “Boulder Sand” (Azevedo, 1983)

### 4.3. Modelo Lade – Kim

São 14 os parâmetros do modelo Lade-Kim. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros deste modelo obtidos por Farias (1986), da escavação experimental de Cambonhas, executadas às margens da lagoa de Itaipu, situado ao sudeste de Niterói, RJ, estes mesmos parâmetros foram também usados para verificar as implementações do modelo na versão 2D do ANLOG, além disso esta escavação já foi objeto de muitos outros estudos, tanto em investigações geotécnicas como análises numéricas utilizando elementos finitos (Nogueira, 1992).

Neste caso para a simulação da etapa de cisalhamento foi considerado uma condição de carregamento  $\Delta Q$  como mostrado na Figura 4.2a, foram utilizados os seguintes carregamentos: 87,1 kPa, 160,5 kPa, 253,2 kPa, e os seguintes tensões de confinamento isotrópico: 20 kPa, 50 kPa e 100 kPa, respectivamente.

Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo Lade – Kim praia Itaipu, RJ (Nogueira 1998)

|                 |          |
|-----------------|----------|
| K <sub>ur</sub> | 735.6    |
| n               | 0.987    |
| v               | 0.4      |
| η               | 59.5     |
| m               | 0.615    |
| c               | 0.000643 |
| p               | 1.52     |
| ψ <sub>2</sub>  | -3.01    |
| μ               | 1.91     |
| h               | 0.789    |
| α               | 0.691    |

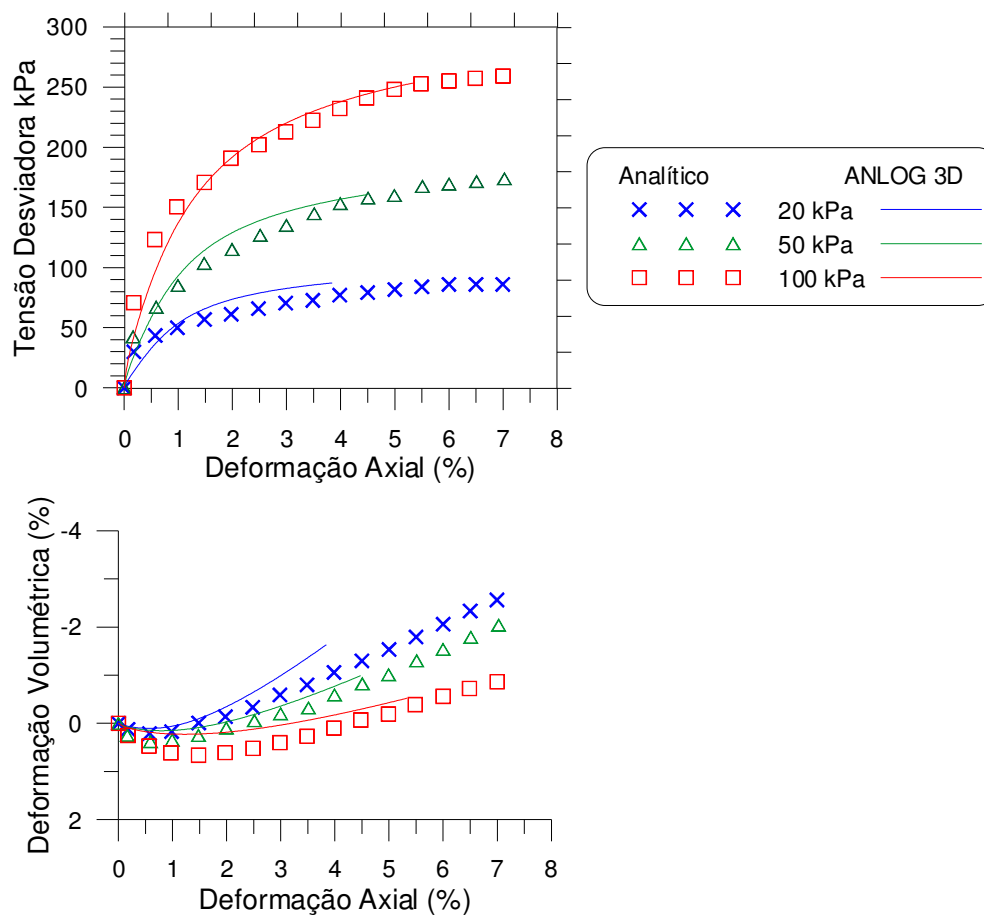


Figura 4.5 – Simulação de ensaio CTC Modelo Lade – Kim Areia da Lagoa Itaipu Niterói–RJ, (Farias, 1986).

A Figura 4.5 apresenta as curvas tensão deformação para diferentes níveis de tensão de confinamento obtidos numericamente e analiticamente.

Observa-se da Figura 4.5, o resultado numérico obtido através do ANLOG 3D, como mencionado anteriormente as simulações com carregamento  $\Delta Q$ , não permitem simular o comportamento pós-pico, a simulação numérica como o analítico apresentam uma boa concordância.

#### 4.4. Modelo Mohr - Coulomb Modificado

No caso do Modelo Mohr Coulomb Modificado, os parâmetros do solo estão apresentados na Tabela 4.4, e a Figura 4.6 mostram as curvas tensão – deformação obtidas para uma tensão de confinamento de 100 kPa e diferentes valores de ângulo de dilatância, obtidos através do ANLOG 3D. Pode-se observar que a resistência à compressão não é afetada pelo ângulo de dilatância, porém as deformações volumétricas são afetadas.

Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo Mohr - Coulomb Modificado

|          |           |
|----------|-----------|
| E =      | 10000 kPa |
| $\nu$ =  | 0,25      |
| C =      | 1,0 kPa   |
| $\phi$ = | 30°       |
| a =      | 0,05      |
| $\psi$ = | Variável  |

A solução analítica do ensaio através do critério de plastificação do Modelo Mohr Coulomb Modificado, apresentada na Figura 4.7, é uma idealização bi-linear. A curva deformação volumétrica – deformação axial possui dois trechos lineares, um trecho elástico (deformações elásticas) e um trecho plástico (deformações plásticas), com inclinações  $\beta_e$  e  $\beta_p$ , respectivamente.



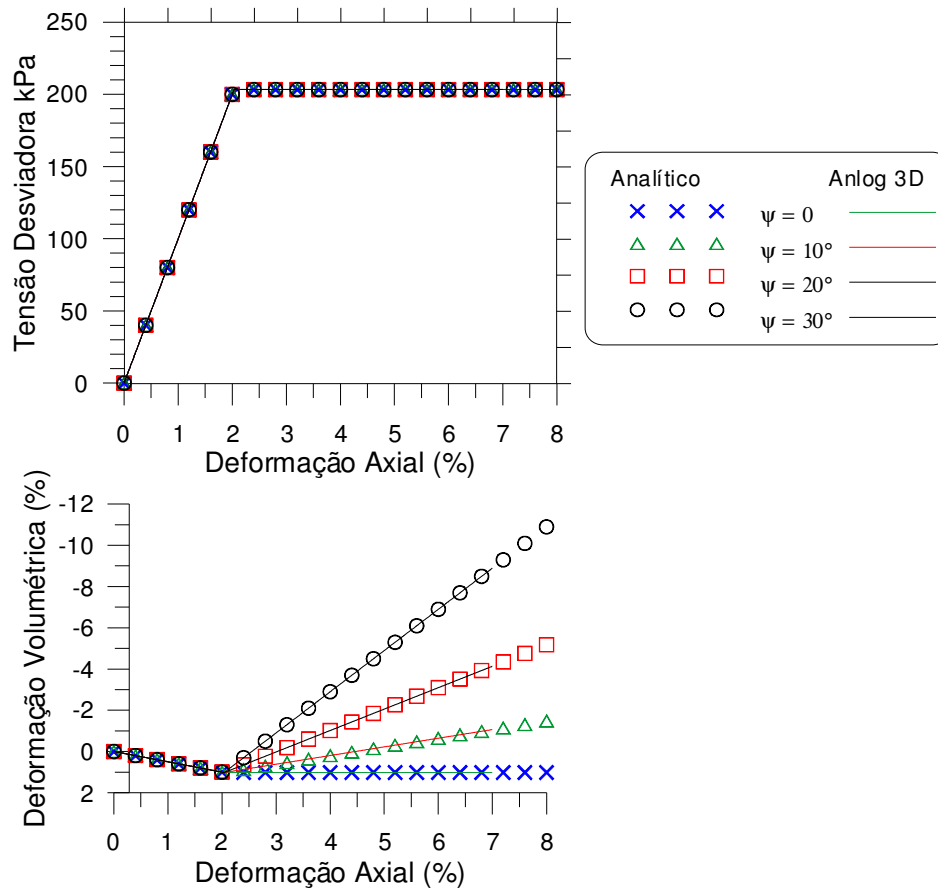


Figura 4.6 – Simulação de ensaios CTC modelo Mohr – Coulomb Modificado

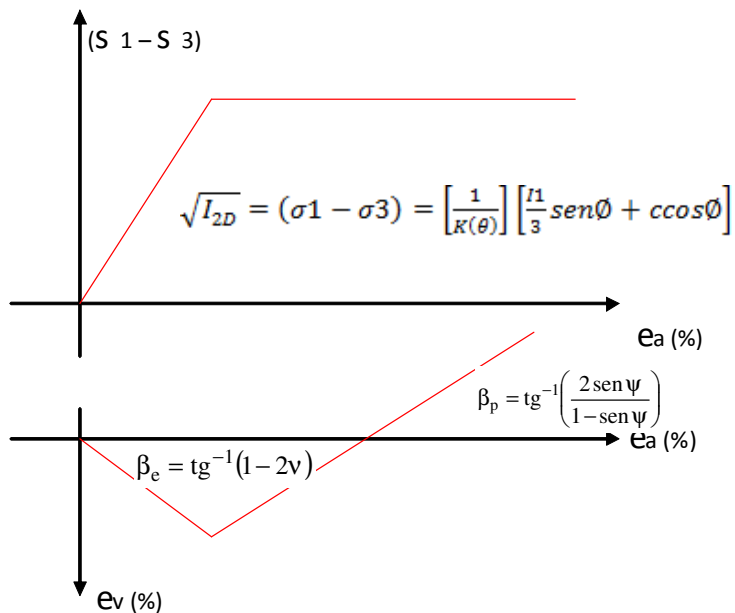


Figura 4.7 – Relação tensão-deformação elástico-perfeitamente plástico

Na Tabela 4.5, são apresentados os resultados analíticos e numéricos em termos de resistência à compressão para dois valores diferentes do ângulo de transição  $\theta_T$ , adotado como forma de tratamento das singularidades relativas às arestas do modelo Mohr-Coulomb original. As soluções analíticas e soluções numéricas são idênticas validando o modelo, mas no caso de  $\theta_T = 30^\circ$ , a solução numérica com o ANLOG 3D só vai fornecer a parte elástica, uma vez atingida à ruptura. A convergência numérica não é possível pelas singularidades relacionadas às arestas, como descrito no capítulo 2 onde, de acordo com Sloan e Broker (1996), o ângulo de transição deveria assumir valores de  $25^\circ$  a  $29^\circ$ . Um ângulo de transição próximo de  $30^\circ$  (por exemplo,  $29.9^\circ$ ) fornece um valor da resistência à compressão mais próximo do valor fornecido pelo modelo Mohr-Coulomb original. No entanto, mais difícil é a convergência numérica. No seguinte capítulo será abordada esta parte com a aplicação do modelo em casos práticos.

Tabela 4.5 – Resistencia a compressão triaxial.

| $\theta_T$ | Analítico<br>( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) <sub>r</sub> kPa | Numérico<br>( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) <sub>r</sub> kPa |
|------------|---|--|
| 29°        | 200,43  | 200,43   |
| 30°        | 203,46  | 203,46   |