

Indicadores da sustentabilidade geotécnica em obras subterrâneas

Vidal Navarro Torres

Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico de Lisboa

Carlos Dinis da Gama

Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico de Lisboa

RESUMO: Actualmente, são cada vez mais importantes as interações entre a sustentabilidade (ST) das actividades humanas e o desenvolvimento sustentável (DS). Nesta conformidade qualquer obra geotécnica tem de ser realizada em equilíbrio com os quatro componentes do ambiente (ar, água, seres vivos, solo/rocha), o qual é possível conseguir através da aplicação de tecnologias limpas, dos princípios da eco-eficiência e uma adequada gestão ambiental, que garantam que a obra tenha elevada permanência no tempo para o benefício da humanidade, no presente e no futuro. Neste artigo aborda-se a ST da componente ambiental solo/rocha através dos índices de sustentabilidade geotécnica (ISG) com aplicação a obras subterrâneas.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, Indicadores, Geotécnica, Obras, Subterrâneas.

1 INTRODUÇÃO

Os três principais suportes do DS são constituídos pela rentabilidade económica, a protecção ambiental e a responsabilidade social, que são determinantes na aplicação prática dos seus princípios fundamentais.

Concordantes com os princípios das Nações Unidas, muitos países, organizações e instituições vêm trabalhando no sentido de operacionalizar o ansiado DS. Assim, a nível da União Europeia (EU) existe uma Comissão denominada *European Commission on Sustainable Development* e a nível das Nações Unidas a denominada *Division for Sustainable Development*, que vêm implementando estratégias do DS a nível regional e global.

O termo *sustentabilidade* (ST) é resultante do conceito de DS e, em termos gerais, pode-se definir como a condição ou característica referida à permanência no tempo de qualquer actividade ou empreendimento e dos benefícios deles derivados.

A ST procura uma harmonia ou equilíbrio entre os aspectos económicos, ambientais e sociais para uma melhoria da qualidade de vida humana, respeitando o direito das próximas gerações em beneficiar, pelo menos, da mesma qualidade de vida. Logo, a ST de qualquer actividade humana faz sentido sempre que

exista a relação necessária entre os sistemas económicos, ambientais e sociais, tendo como núcleo central o Homem.

Para uma real e eficaz gestão do DS é necessário usar modelos ou processos que permitam avaliar a ST das diversas actividades que o Homem desenvolve, sendo esta avaliação possível através dos *Índices de Sustentabilidade* (IS), quer no campo económico, quer no ambiental ou no social.

Para o caso específico da componente ambiental solo/rocha utilizam-se os *Índices de Sustentabilidade Geotécnica* (ISG), que a seguir se descrevem.

2 ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE DAS OBRAS GEOTÉCNICAS

A operacionalização do DS é uma tarefa muito complexa, sendo uma importante ferramenta que pode ser utilizada para a gestão baseada nos critérios da ST que, através dos IS, dão origem a critérios de decisão muito importantes.

Com efeito, os IS permitem obter informação sobre a sustentabilidade de qualquer sistema e, neste caso, sobre as obras geotécnicas. Os IS permitem ainda verificar como o objectivo de obter resultados positivos em termos de produto

“per capita” se arrisca à degradação precoce dos recursos naturais, do ambiente e da sociedade. Sabe-se que todos os tipos de desenvolvimento implicam riscos, pelo que é necessário controlá-los através da fixação de limites admissíveis. Logo, os IS devem ser relevantes, compreensíveis e confiáveis.

Estudos que se vem realizando no Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico permitem propôr um modelo para avaliar a ST de uma obra geotécnica através do Índice de Sustentabilidade Ambiental (ISA), do Índice de Sustentabilidade Ambiental (ISA), do Índice de Sustentabilidade económico (ISE) e o Índice de Sustentabilidade social (ISS) (Fig. 2).

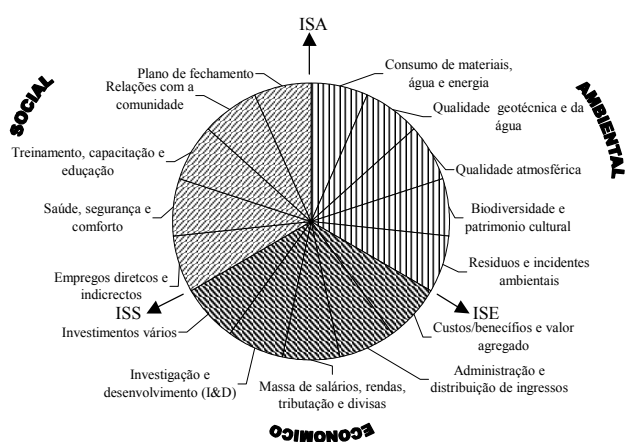


Figura 2 – Indicadores de Sustentabilidade em Obras Geotécnicas

Cada um dos 15 indicadores apresentados na Fig. 2, pode ter muitos mais sub-indicadores, dependendo do tipo, dimensão, localização e outras características da obra, podendo atingir até mais de uma centena.

Por outro lado, cada um dos IS pode-se expressar através de índices que variam de 0 a 1, sendo o nível da ST caracterizável por meio de uma escala apropriada, como a indicada na Tabela 2.

No presente artigo aborda-se apenas o indicador da qualidade geotécnica aplicada a uma obra subterrânea, composto por três sub-indicadores que são: estabilidade das aberturas, subsidência e dinâmica de vibrações.

3 MODELO MATEMÁTICO PARA A QUANTIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE GEOTÉCNICA

3.1 Modelo geral

Considerando os três sub-indicadores do DS das obras geotécnicas subterrâneas, pode-se definir um Índice de Sustentabilidade Geotécnica (ISG) mediante a equação (1) em função do Índice de Sustentabilidade Geotécnica devido à Estabilidade (ISG_e), do Índice de Sustentabilidade Geotécnica relacionado com a Subsidência (ISG_s) e do Índice de Sustentabilidade Geotécnica devido a vibrações (ISG_v). Matematicamente tem-se:

$$ISG = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^{i=3} ISG_i = \frac{1}{3} (ISG_e + ISG_s + ISG_v) \quad (1)$$

e é possível caracterizar mediante níveis de sustentabilidade (Tabela 2).

Tabela 2 – Níveis de sustentabilidade sugeridas para as obras geotécnicas

$0 \leq ISG \leq 0.25$	$0.25 < ISG \leq 0.50$	$0.50 < ISG \leq 0.75$	$0.75 < ISG \leq 1$
Muito baixa	Baixa	Moderada	Boa

Obs.: ISG= Índice de Sustentabilidade Geotécnica

Para calcular o índice de sustentabilidade de cada sub-indicador deve-se usar a condição de sustentabilidade de cada elemento poluente (X e/ou X') ser baseada no padrão mínimo de sustentabilidade ou de qualidade de vida, dado pelas normas em vigor. Três critérios são possíveis, considerando a condição local dos elementos ou variáveis ambientais (x_i) e quando a sustentabilidade se obtém com:

- 3 $x_i < X$;
- 4 $x_i \geq X$;
- 5 $X' < x_i < X$.

Considerando as condições do critério 1, o IS pode-se calcular usando a equação (2), onde a classificação dos indicadores é baseada na condição $x_i < X$ e os valores baixos de x_i conduzem a uma sustentabilidade alta, significando que X é um padrão máximo.

$$IS = 1 - \left[\frac{x_i}{X} \right], \text{ Se: } x_i = X \text{ ou } x_i > X \rightarrow IS = 0 \quad (2)$$

Nas condições do critério 2, o IS pode ser calculado usando a equação (3), baseado na condição $x_i \geq X$, onde valores altos de x_i geram valores altos de sustentabilidade. Neste caso, X corresponde a um padrão mínimo.

$$IS = \frac{x_i}{X}, \text{ Se: } x_i = X \text{ ou } x_i > X \rightarrow IS = 1 \quad (3)$$

Considerando as condições do critério 3, o IS pode ser calculado pelas equações (4 e 5), baseado na condição $X' < x_i < X$ onde, para altos valores de x_i ($x_i > X$), a sustentabilidade é baixa e é insustentável a X_I para baixos valores de x_i ($x_i < X'$) a sustentabilidade é baixa e insustentável a X_I' .

$$\text{Se } X' < x_i < X \rightarrow IS = 1$$

$$\text{Se } x_i > X \rightarrow IS = 1 - \frac{x_i - X}{X_1 - X} \quad (4)$$

$$\text{Se } x_i < X \rightarrow IS = 1 - \frac{X' - x_i}{X' - X_1'} \quad (5)$$

$$\text{Se } X_1' > x_i > X_1 \rightarrow IS = 0$$

3.2 Índice de sustentabilidade geotécnica devido à estabilidade (ISG_e)

O ISG_e está relacionado com a qualidade geotécnica do terreno ou maciço onde é realizada a obra geotécnica, a geometria da abertura e os fins para os quais será destinada a obra e, em termos gerais, o modelo matemático proposto é o expresso mediante a equação (6).

$$ISG_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ISG_{e(i)} \quad (6)$$

onde n é a quantidade de trechos da abertura subterrânea com características geotécnicas similares.

A estabilidade duma abertura subterrânea ao longo do tempo pode-se avaliar considerando a necessidade ou não de suporte.

3.2.1 Estabilidade de aberturas subterrâneas sem suporte

Aplicando a equação (2) e o critério de impacto ambiental geotécnico de Navarro Torres et al.,

2005, a sustentabilidade de uma abertura subterrânea que permanecerá estável ao longo do tempo sem necessidade de suporte (ISG_{e1}) será:

$$ISG_{e1} = 1 - \frac{A}{2.282 \cdot ESR \cdot Q^{0.3898}} \quad (7)$$

(Equação 3)

onde A é a dimensão geométrica da abertura (m), ESR (*Excavation Support Ratio*) é o índice Q (*Tunnelling Quality Index*) (Barton N. E., 2000).

3.1.1 Estabilidade de aberturas subterrâneas com suporte

Aplicando a equação (3) e para a rotura de um maciço que envolve uma abertura subterrânea, que sucede quando a pressão de suporte p_i é inferior à pressão crítica do suporte P_{cr} , nesta condição, a sustentabilidade geotécnica ISG_{r2} será:

$$ISG_{e2} = \frac{(1+K)p_i}{2P_o - \sigma_{cm}} \quad (8)$$

onde K é o factor calculado em função do ângulo de atrito do maciço ϕ (Equação 9), P_o é a tensão *in situ* no maciço, σ_{cm} é a resistência à compressão simples do maciço, calculada em função da coesão c e do ângulo de atrito (Equação 10).

$$K = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \quad (9)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 + \text{sen } \phi} \quad (10)$$

3.2 Índice de sustentabilidade geotécnica relacionado com a subsidência (ISG_s)

Os danos a edificações devidos a obras geotécnicas subterrâneas (túneis) em zonas urbanas devem ser controlados considerando como limite o Nível 2 (Tabela 3) na escala de danos devidos a subsidências causadas pela construção de túneis (Burtland, J.B., 1995).

Tabela 3 – Limites admissíveis na subsidência

Nível danos	Grau	Limite $\varepsilon_{h(L)}$ (%)
0	Insignificante	0 – 0.05
1	Muito leve	0.05 – 0.075
2	Leve	0.075 – 0.15
3	Moderado	0.15 – 0.30
4 a 5	Severo/muito severo	>0.30

Obs.: $\varepsilon_{h(L)}$: limite de deformação horizontal

No caso de $\varepsilon_h > 0.15$ (> do nível 2) existe risco de provocar danos nos edifícios, neste caso de edifícios de betão.

Portanto, aplicando a equação (2) o ISG_s pode-se calcular com a equação (11).

$$ISG_s = 1 - \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{h(L)}} = 1 - 6.67\varepsilon_h \quad (11)$$

onde ε_h é a deformação horizontal (%) calculada com a equação (12) e $\varepsilon_{h(L)}$ é a deformação horizontal limite admissível (0.15 %).

$$\varepsilon_h = \frac{\delta_v}{z_o} \left(\frac{x^2}{i_x^2} - 1 \right) \quad (12)$$

Na equação (12) δ_v é o deslocamento vertical transversal acima do túnel, que pode ser calculado com a equação (13), z_o é a distância da superfície ao eixo central do túnel, x é a distância horizontal desde o eixo do túnel e i_x é a distância do eixo á inflexão máxima da curva de Gauss ($i_x = 0.43z_o + 1.1$)(Fig. 2) de deslocamentos (Fig. 4) que influenciam o ISG_s .

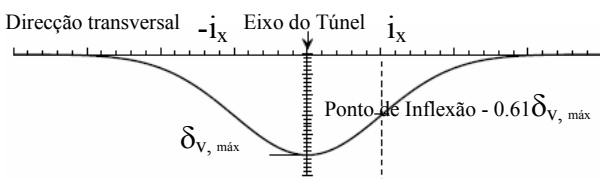


Figura 3 – Curva de Gauss de deslocamento na secção transversal

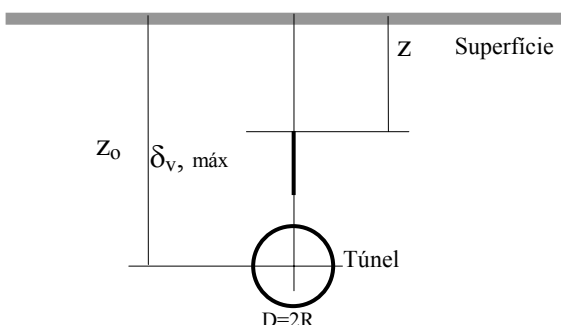


Figura 4 – Parâmetros que influenciam o ISG_s

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4i_x} e^{-\frac{x^2}{i_x^2}} \quad (13)$$

onde V_L é a denominada perda de volume (%) que se calcula com a equação (14) baseada na equação proposta por Borms and Bennemark (Niklas Franzius, J., 2003), onde D é a largura do túnel.

$$V_L = 1.33 \left(\frac{P_t - P_s}{\sigma_t} \right) - 1.4 \quad (14)$$

Nesta equação P_t é a pressão total do terreno no nível do eixo central do túnel (inclui carga superficial), P_s é a pressão do suporte e σ_t é a resistência à tracção do terreno.

3.1 Índice de sustentabilidade geotécnica devido a vibrações (ISG_v)

O ISG_v pode-se exprimir através da equação (2), resultando para *incomodidade humana* residencial diurna a equação (15) e para *danos nas estruturais* a equação (16):

$$ISG_v = 1 - 5 \left(\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \right) \quad (15)$$

$$ISG_v = 1 - \frac{1}{v_L} \left(\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \right) \quad (16)$$

onde v_x é a componente longitudinal da vibração, v_y é a componente transversal e v_z é a componente vertical, o coeficiente 5 é resultante do padrão definido pela Norma ISO2631-2:1989 (0.2 mm/s) e v_L é a velocidade limite admissível pelas normas (mm/s), no caso de Portugal a NP 2074.

4 ALGUNS CASOS DE ESTUDO

Como parte aplicativa do modelo desenvolvido, apresentam-se, na Tabela 4, resultados de valores médios de vários casos de estudo da sustentabilidade geotécnica de diversos trabalhos geotécnicos subterrâneos baseados nos estudos realizados por Navarro Torres et al., 2005.

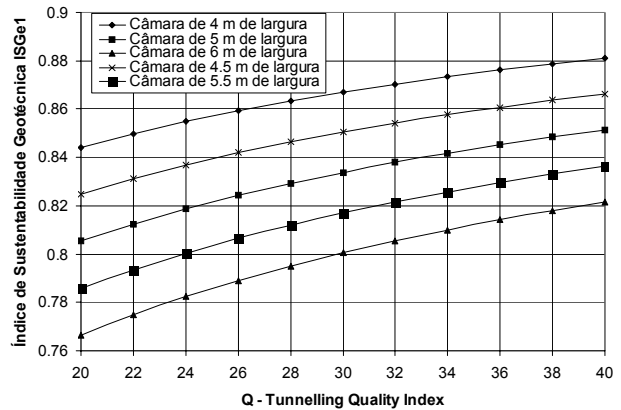
Inclui-se também, simulação da variabilidade dos Índices de Sustentabilidade em função da qualidade do maciço rochoso, da profundidade da abertura subterrânea, da velocidade de vibração, pressão de suporte e da resistência do maciço rochoso, para exemplos das Minas da Panasqueira(Fig. 5), de Neves Corvo, Túnel da Gardunha(Fig. 6), Metro de Lisboa (Fig. 7) e Túnel do Rossio (Fig. 8).

Tabela 4 - Resultados da aplicação dos modelos matemáticos a casos práticos.

Local	Parâmetros utilizados	Índices de sustentabilidade	
Mina Panasqueira	Desmontes do Nível 3, rocha xisto com $v_p=5100$ m/s, $Q=39.8$ e para câmaras de 5 m e $ESR=3.5$	ISG_{el}	0.98
Mina Neves Corvo	Rocha xisto com $Q=2.5$ a 20.3, $ESR=3.5$ para aberturas de 5m (Rampa CRAMS03)	ISG_{el}	0.56 a 0.81
Túnel da Gardunha	Solo e rocha muito alterada com $\sigma_{cm}=0.116$ MPa, $K=1.3$, $\phi=7.5^\circ$, $c=50$ kPa, $\pi=0.3$ a 0.75MPa, $P_o=0.4$ MPa	ISG_{e2}	0.78 a 1.00
Metro de Lisboa (Linha Am)	Ponto (E19) de medição em zona com túnel a 15 m de profundidade, solo e rocha alterada, $v=0.078$ mm/s	ISG_v	0.61
Túnel do Rossio (Centro das Taipas)	Túnel com $D=10.88$ m, $z_o=20$ m em terreno com $E_m=70$ MPa, $c=120$ kPa, $\gamma=21$ KN/m ³ , $\nu=0.35$, $\sigma_i=0.117$ MPa	ISG_s	0 a 0.13

Os resultados dos cálculos indicam que na Mina da Panasqueira o índice de sustentabilidade geotécnica da estabilidade é boa (0.98), na mina de Neves Corvo (Rampa CRAMS03) é também boa (0.56 a 0.81), no Túnel da Gardunha resulta boa (0.78 a 1.00), numa das estações da Linha Amarela do metro de Lisboa a sustentabilidade devido as

vibrações resulta boa(0.61) e na reabilitação do Túnel do Rossio (aplicação do suporte primário) na zona do Centro das Taipas (Navarro Torres, V., 2006) a sustentabilidade



foi muito baixa (0.13).

Figura 5 – Índices de Sustentabilidade Geotécnica ISG_{e1} na Mina da Panasqueira

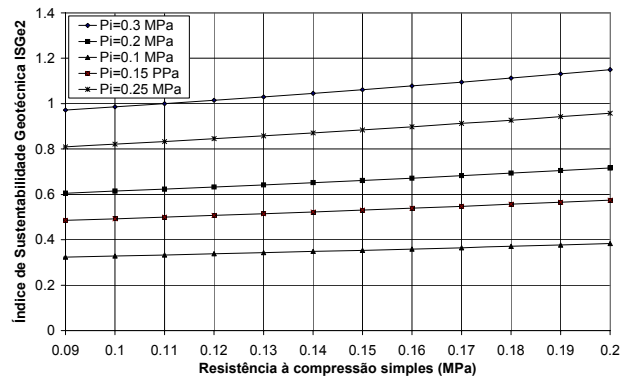


Figura 6 – Índices de Sustentabilidade Geotécnica ISG_{e2} no Túnel da Gardunha

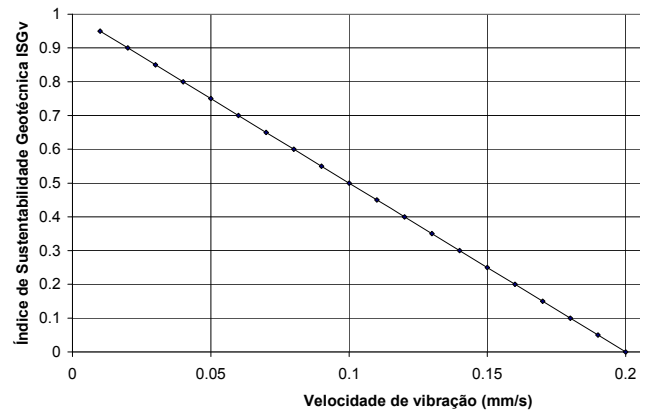


Figura 7 – Índices de Sustentabilidade Geotécnica ISG_v no Túnel Linha Vermelha do Metro de Lisboa Ponto E19

Os índices de sustentabilidade elaborados indicam que a obra geotécnica poderá ser utilizada ao longo do tempo sem maiores riscos, mas que precisam de uma adequada manutenção. Os índices de sustentabilidade

moderados, baixos a muito baixos indicam a necessidade de tomar medidas de aplicação de sistemas operativos e de suporte para o tipo de terreno, de forma a atingir uma boa sustentabilidade.

Figura 8 – Índices de Sustentabilidade Geotécnica ISG_s no Túnel do Rossio

5 CONCLUSÕES

O sector das obras geotécnicas apresenta um carácter de grande importância para o desenvolvimento da humanidade, pelo que os projectos se devem desenvolver com um bom índice de sustentabilidade, ou seja, estes empreendimentos devem ser economicamente viáveis com a protecção ambiental e responsabilidade social.

Através do exposto no presente artigo, verifica-se que o Desenvolvimento Sustentável das Obras Geotécnicas pode ser quantificado através de um Índice de Sustentabilidade adequado.

Este modelo matemático abre o caminho para uma avaliação e análise do Desenvolvimento Sustentável das Obras Geotécnicas de forma pragmática, deixando de lado as abordagens puramente teóricas.

REFERÊNCIAS

- Barton N. E e Grimstad, E. (2000). El Sistema Q para la selección del sostenimiento en el método Noruego de excavación de túneles. Capítulo 1, Ingeo Túneles Libro 3, Madrid.
- Burland, J. B. (1995). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Invited Special Lecture. In: *1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, IS Tokyo '95*.
- Navarro Torres, Vidal, et al. (2005). Engenharia Ambiental Subterrânea e aplicações. CETEM/CYTED/CNPq Rio de Janeiro.
- Navarro Torres, Vidal, (2005). Estudo do comportamento geotécnico na zona do Centro das Taipas durante o processo de reabilitação do Túnel do Rossio. Estudo interno CEGEO-DHV/FBO Consultores S.A.
- Niklas Franzius, J., 2003. Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence. PhD Thesis, Imperial College of Science, UK.
- Parker, H.W. (2004). The tunnels and the Environment. Tunnelling Asia 2004 Need for Accelerated Underground Construction Issues & Challenges. ITA.
- Tribune N.º 21. International Tunneling Association ITA. Fevereiro, 2002
- United Nations - Division for Sustainable Development Disponível em <<http://www.un.org/esa/sustdev/csd/cycle1.htm>>. Acesso em 07 de Março de 2006.
- United Nations - Population Division: World Population prospects: The 2004 Revision Database Disponível em <<http://esa.un.org/unpp/index.asp?panel=1>> Acesso em 07 de Março de 2006