5
Método de Olson (2001)

Na literatura existem várias técnicas empíricas para análise da liquefação de solos, como as de Campanella (1985), Seed e Harder (1990) e Olson (2001). Neste capítulo é brevemente descrito o método de Olson (2001), proposto após a retroanálise de 33 casos de rupturas por fluxo de liquefação, envolvendo areias limpas, areias siltosas, siltes arenosos e rejeitos arenosos.

O método de Olson envolve 3 etapas básicas: (a) avaliação da suscetibilidade de liquefação; (b) análise do mecanismo de início de liquefação (gatilho); (c) estimativa da estabilidade de taludes pós-liquefação.

5.1.
Suscetibilidade à liquefação

Esta etapa de análise simplesmente determina se o solo tem comportamento contrativo ou dilatante sob ao estado de tensão atuante in situ. A suscetibilidade à liquefação é inferida com base na tensão vertical efetiva inicial e o número de golpes do ensaio de penetração dinâmica SPT ou do ensaio de cone CPT em determinada profundidade. A figura 5.1 apresenta os gráficos de suscetibilidade recomendados por Olson (2001) e Olson e Stark (2003). Valores plotados à esquerda dos mesmos indicam que o solo tem tendência à contração de volume sob cisalhamento, portanto apresenta suscetibilidade à liquefação; por outro lado, valores situados à direita dos gráficos recomendados por Olson (2001) correspondem a solos dilatantes, não suscetíveis à ocorrência do fenômeno.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

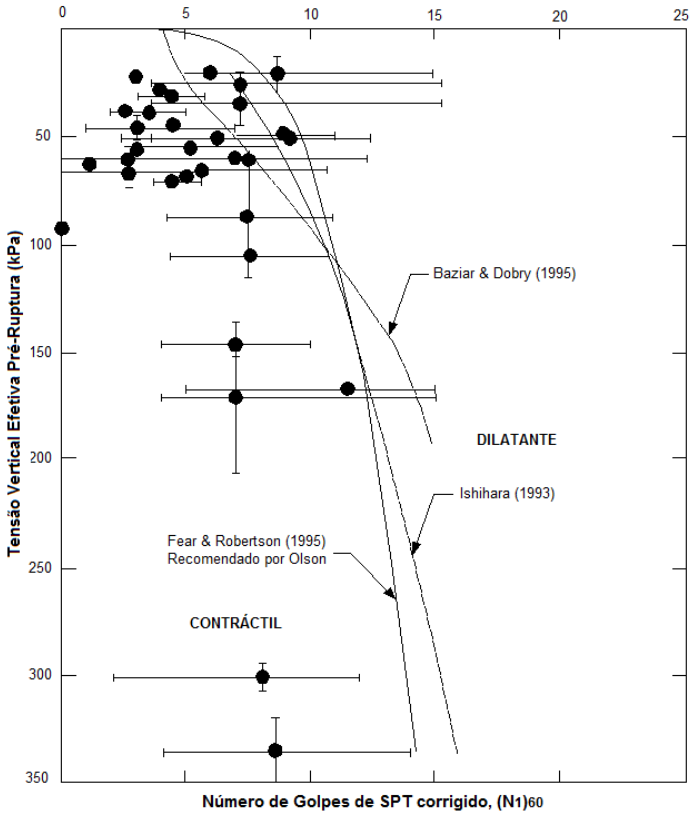

Figura 5.1 – Gráficos de suscetibilidade à liquefação recomendados por Olson (2001) para ensaios SPT.

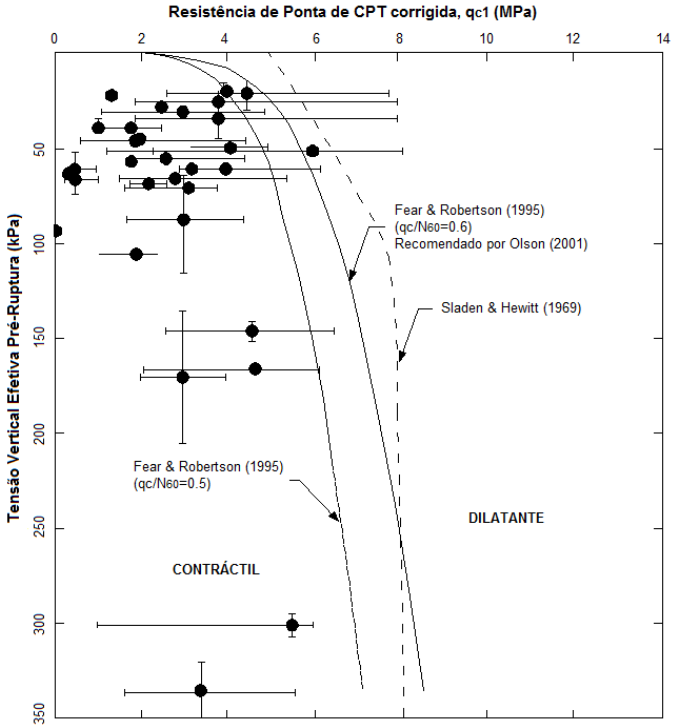

Figura 5.2 – Gráficos de suscetibilidade à liquefação propostos por Olson (2001) para ensaios CPT.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

As curvas de Fear & Robertson (1995), recomendadas por Olson (2001) nas figuras 5.1 e 5.2, são matematicamente expressas por:

$$(\sigma'_{vo})_{contorno} = 9.5812x10^{-4}[(N_1)_{60}]^{4.7863} \quad (5.1)$$

$$(\sigma'_{vo})_{contorno} = 1.1047x10^{-2}[(q_{c1})]^{4.7863} \quad (5.2)$$

onde $(N_1)_{60}$ e q_{c1} são valores corrigidos dos resultados de campo medidos através de ensaios SPT e CPT, respectivamente.

Seed (1987) e Seed e Harder (1990) propuseram a seguinte correção dos valores do número de golpes N medidos em campo no ensaio SPT para cálculo do número de golpes corrigido $(N_1)_{60}$ normalizado em relação ao valor de 60% da energia teórica de queda livre do martelo

$$(N_1)_{60} = NC_N\left(\frac{ER}{60}\right) \quad (5.3)$$

onde *ER* é a porcentagem de energia utilizada no ensaio e C_N o fator de correção da tensão vertical efetiva, sugerido por Liao e Whitman (1986) como:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^n \quad (5.4)$$

onde P_a é a pressão atmosférica e o valor do expoente n = 0.5, admitido por Olson (2001) para todos os solos que apresentem suscetibilidade de liquefação.

Para o caso do ensaio CPT, a resistência de ponta corrigida q_{c1} é obtida pela aplicação da equação (5.3)

$$q_{c1} = q_c C_q \quad (5.5)$$

onde Cq é o fator de correcão do nível de tensões para o ensaio CPT, proposto por Kayen et al. (1992) como

$$C_q = \frac{1.8}{0.8 + \left(\frac{\sigma_{vo}'}{P_a}\right)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

5.2.
Inicio da liquefação

Se as zonas de solo arenoso forem identificadas como suscetíveis à liquefação, uma análise do início da liquefação deve ser executada para determinar se o carregamento imposto é suficiente para provocar o fenômeno.

A figura 5.3 esquematicamente apresenta o comportamento de um solo contrativo durante carregamento não drenado. A resistência ao cisalhamento não drenada é definida como a máxima resistência disponível durante o carregamento. Amolecimento não drenado pode ser causado por carregamentos estáticos ou dinâmicos, ou por deformações sob tensões cisalhantes superiores à resistência ao cisalhamento liquefeita.

Hanzawa et al. (1979) mediram picos de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaios de compressão triaxial executados em areias contrativas sob diferentes tensões de confinamento mas mesmo índice de vazios. Constataram que estes valores de resistência situam-se aproximadamente sobre uma envoltória linear de resistência.

A razão de resistência é definida como o quociente entre a resistência não drenada de pico e a tensão vertical efetiva inicial $\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{vo}}$, sendo aproximadamente equivalente à inclinação da envoltória de resistência

$$\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{vo}} = \tan(\phi_m) \tag{5.7}$$

onde ϕ_m é o ângulo de atrito mobilizado.

Rupturas causadas por carregamentos estáticos podem ser utilizadas para estimativas da razão de resistência porque os valores determinados nas retroanálises correspondem diretamente aos da envoltória de resistência.

Para ilustrar este conceito considere um elemento (ponto A) no interior de um depósito de solo contrativo, saturado, carregado pela construção de um aterro. Com a colocação de uma camada de aterro, o elemento move-se do ponto A para o ponto B situado sobre a envoltória de resistência, indicando a máxima resistência ao cisalhamento que o elemento de solo pode mobilizar sob condição não drenada. Quando as tensões de cisalhamento induzidas pelo lançamento de uma nova camada tentam ultrapassar este valor limite (ponto B) o solo colapsa e o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

início da liquefação acontece. O elemento move-se do ponto A para o ponto C, que representa a resistência ao cisalhamento do solo liquefeito. Logo, para casos de ruptura provocados por carregamento estático, as tensões cisalhantes mobilizadas em solos contrativos imediatamente antes do colapso são aproximadamente iguais à resistência ao cisalhamento não drenada. Pela execução de uma análise de estabilidade é possível então conseguir-se uma estimativa razoável da razão de resistência em zonas de solos contrativos.

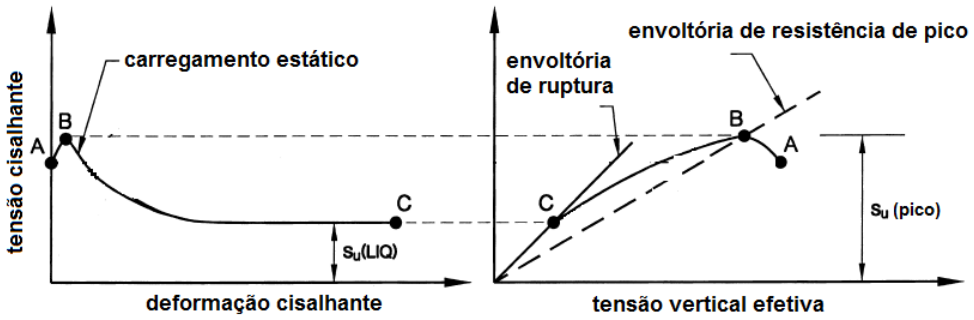

Figura 5.3 – Resposta esquemática não drenada de um solo contrativo saturado (adaptado de Olson e Stark, 2003).

Os passos para análise do potencial de início de liquefação são os seguintes:

- Executar uma análise de estabilidade de taludes para estimativa das tensões cisalhantes estáticas $\tau^{estática}$ nos solos suscetíveis à liquefação. Valores iniciais de resistência ao cisalhamento são assumidos para estes solos, modificando-os até que o fator de segurança FS =1 seja atingido. Para os solos não suscetíveis à liquefação atribuir valores da resistência ao cisalhamento drenada ou não-drenada, dependendo do tipo de solo.
- Dividir em fatias a região de solo delimitada pela superfície crítica de ruptura determinada anteriormente. Segundo Olson e Stark (2003) um número de 10 a 15 fatias é suficiente.
- Determinar os valores corrigidos de resistência à penetração dos ensaios SPT e/ou CPT com auxílio das equações 5.3 e 5.5, respectivamente.
- Determinar a razão de resistência $\frac{S_u^{pico}}{\sigma'_{vo}}$ com base nos gráficos das figuras 5.4 e 5.5, cujas equações para as linhas médias são expressas por

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

$$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{vo}} = 0.205 + 0.0075[(N_1)_{60}] \pm 0.04 \qquad \text{para } (N_1)_{60} \le 12 \qquad (5.7)$$

$$\frac{S_u(Pico)}{\sigma'_{vo}} = 0.205 + 0.0143[(N_1)_{60}] \pm 0.04 \qquad \text{para } q_{c1} \le 6.5MPa \qquad (5.8)$$

- Multiplicar a razão de resistência pela tensão vertical efetiva inicial para calcular o correspondente valor de S_u^{pico}.
- Determinar o fator de segurança contra o início de liquefação para cada fatia dos solos suscetíveis à liquefação por:

$$FS^{liquefação} = \frac{S_u^{pico}}{\tau^{estática}} \qquad (5.9)$$

Se todos os valores de fator de segurança forem superiores à 1 então uma análise de estabilidade pós-liquefação não é necessária. Se para algumas fatias $FS^{liquefação} < 1$ então atribuir-lhes o valor da resistência ao cisalhamento liquefeita e prosseguir com uma análise de estabilidade pós-liquefação.

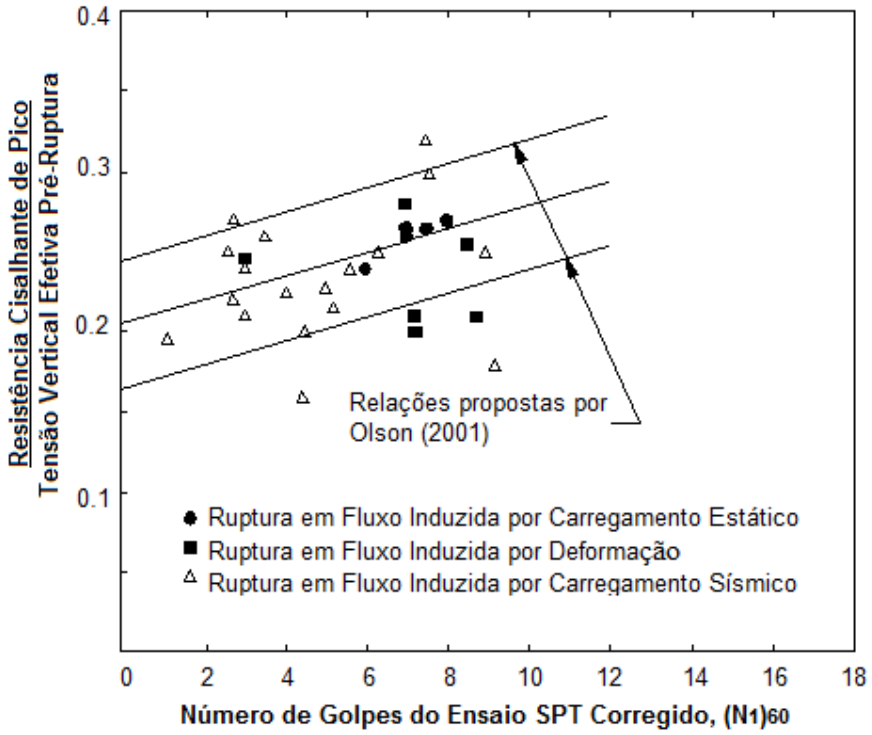

Figura 5.4 – Correlação entre a razão de resistência não-drenada e o número de golpes corrigido do ensaio SPT (adaptado de Olson, 2001).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

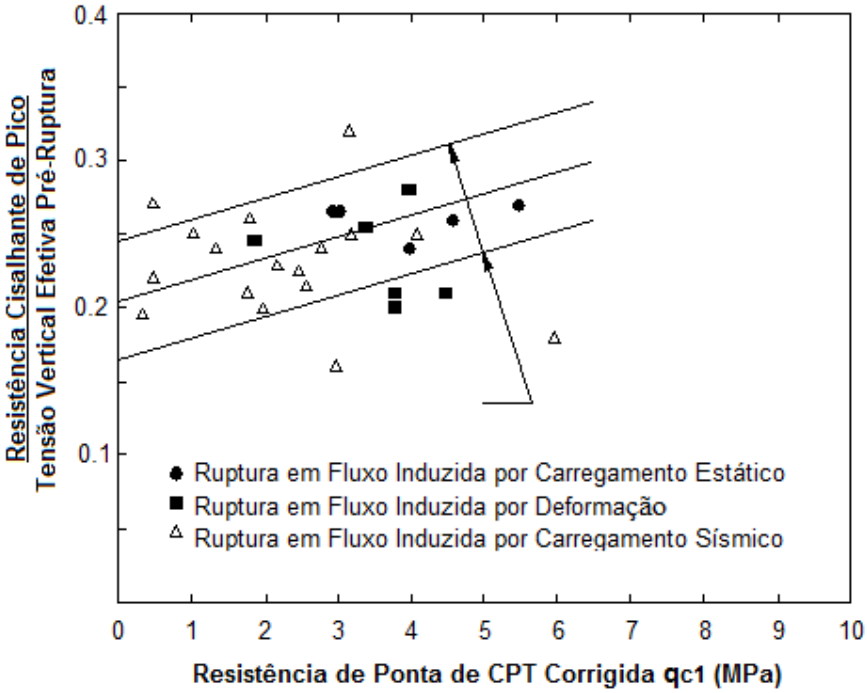

Figura 5.5 – Correlação entre a razão de resistência não-drenada e a resistência de ponta do ensaio CPT corrigido (adaptado de Olson, 2001).

5.3. Estabilidade pós-liquefação

Se o início de liquefação acontece, uma análise de estabilidade pós-liquefação deve ser executada para verificar se as tensões de cisalhamento estáticas excedem à resistência ao cisalhamento disponível do solo liquefeito. A razão de resistência nesta etapa considera o valor na condição liquefeita, que pode ser obtida dos gráficos recomendados por Olsen (2001) nas figuras 5.6 e 5.7. As expressões matemáticas das suas linhas médias são:

$$\frac{S_u(Liq)}{\sigma'_{vo}} = 0.03 + 0.0075\left[(N_1)_{60}\right] \pm 0.03 \qquad \text{para } (N_1)_{60} \le 12 \qquad (5.10)$$

$$\frac{S_u(Liq)}{\sigma'_{vo}} = 0.03 + 0.0143\left[(N_1)_{60}\right] \pm 0.03 \qquad \text{para } q_{c1} \le 6.5MPa \qquad (5.11)$$

Valores de resistência ao cisalhamento liquefeita são então atribuídos às fatias dos solos suscetíveis à liquefação onde $FS^{liquefação} < 1$. Para as demais fatias são considerados os valores de resistência ao cisalhamento drenada ou não-drenada, dependendo do tipo de solo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

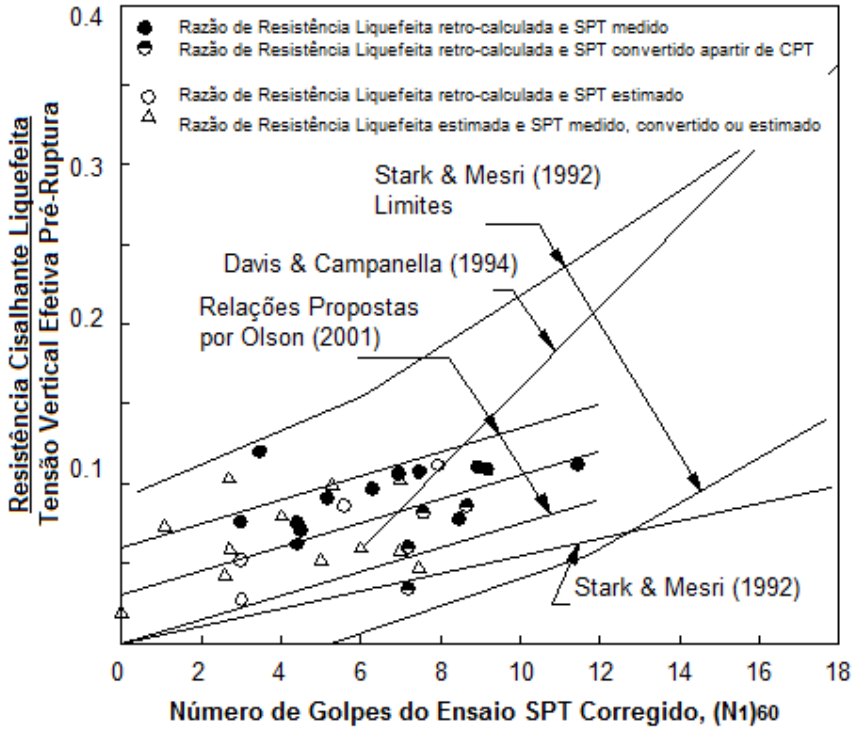

Figura 5.6 – Correlação entre a razão de resistência pós-liquefeita e o número de golpes corrigido do ensaio SPT (adaptado de Olson, 2001).

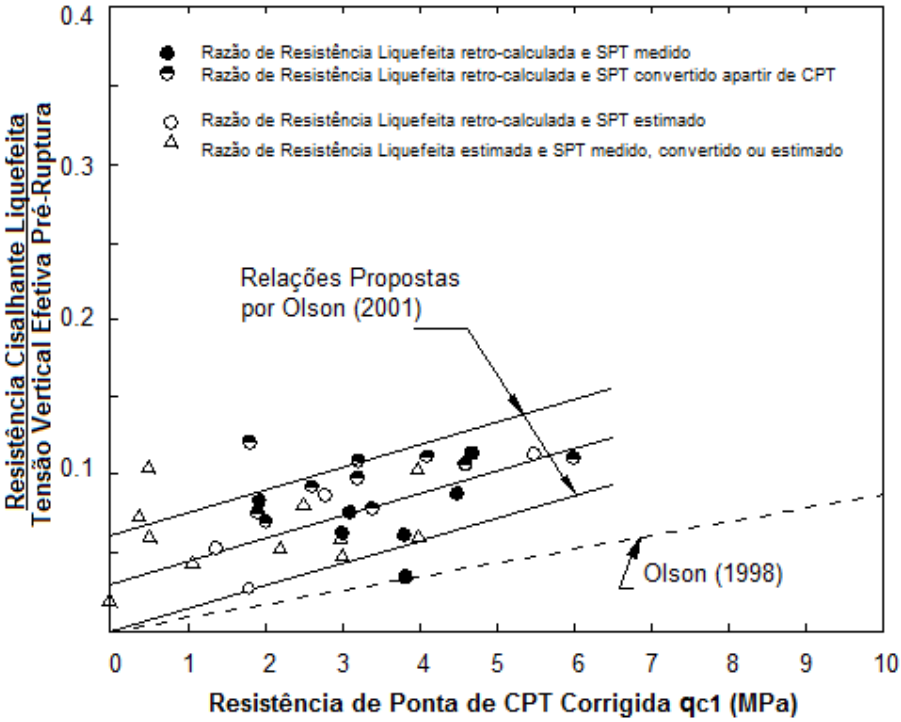

Figura 5.7 – Correlação entre a razão de resistência pós-liquefeita e a resistência de ponta corrigida do ensaio CPT (adaptado de Olson, 2001).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA

Se nesta análise de estabilidade o fator de segurança FS^{fluxo} resultar igual ou inferior a 1 então fluxo por liquefação deve ocorrer. Se $1 < FS^{fluxo} \leq 1.1$ alguma deformação poderá ocorrer e a análise de estabilidade é novamente executada atribuindo-se valores da resistência ao cisalhamento liquefeita às demais fatias onde $FS^{liquefação} \leq 1.1$, o que considera a possibilidade do desenvolvimento de ruptura progressiva do talude. O valor mínimo de FS^{fluxo} será determinado quando em todas as fatias de solo contrativo ocorrer o início da liquefação e, na análise de estabilidade na condição pós-liquefação, para todas estas fatias for atribuído o valor da resistência ao cisalhamento liquefeita.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012285/CA