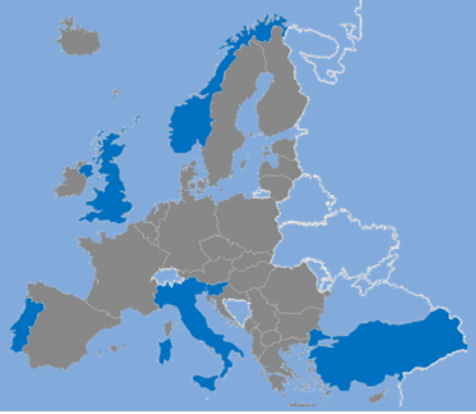
European Commission

Horizon 2020
European Union funding
for Research & Innovation

liquefACT



Tecniche di mitigazione del rischio liquefazione sismo-indotta dei terreni

Alessandro Flora
Emilio Bilotta
Gianluca Fasano
Lucia Mele
Valeria Nappa

Università degli studi di Napoli Federico II

Anna Chiaradonna — *Università degli studi dell'Aquila*

Stefania Lirer — *Università telematica G. Marconi*

INDICE DELLA PRESENTAZIONE

1. Meccanismi di interesse
2. Le norme (NTC_2018) e le verifiche
3. Scopo delle tecniche di mitigazione
4. Il progetto della *Parziale Saturazione Indotta* (IPS)
5. Conclusioni

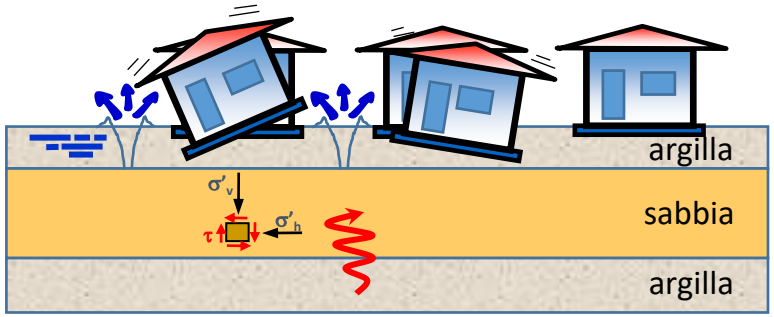
Cosa è la liquefazione sismica?

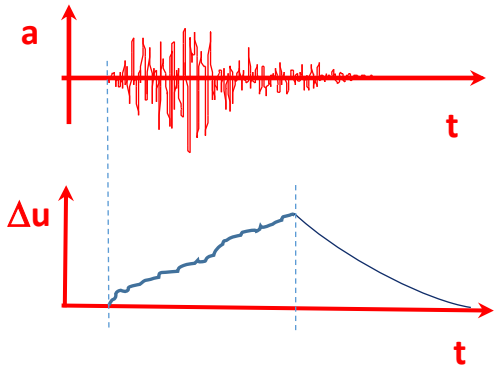
$$\sigma'(t) = \sigma'_0 - \Delta u(t) \longrightarrow 0$$

$$r_u(t) = \frac{\Delta u(t)}{\sigma'_0} \longrightarrow 1$$

$$G(t) = G\big(\sigma'(t)\big) \longrightarrow 0$$

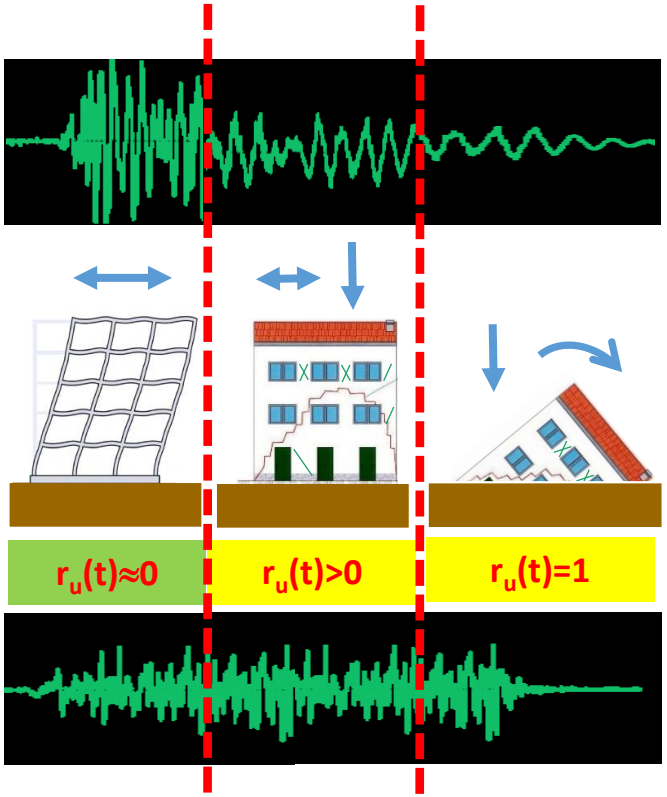
$$\tau_f(t) = \sigma'(t) \cdot \tan\varphi \longrightarrow 0$$

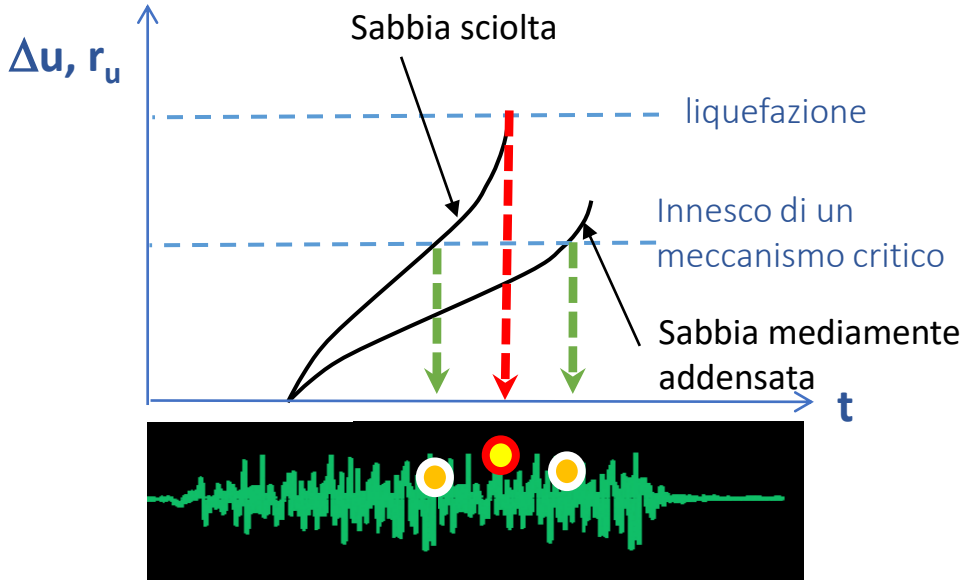


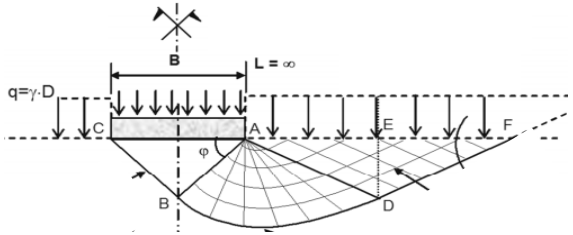


E’ una perdita temporanea di rigidezza e resistenza al taglio del terreno in risposta ad un evento sismico

Effetti sulle strutture







Durante l'evento sismico, stati limite possono essere raggiunti anche prima della completa liquefazione, o addirittura in terreni non liquefacibili

Effetti sulle strutture

Niigata, Giappone 1964

Kocaeli, Turchia 1999

Christchurch, Nuova Zelanda 2011

Christchurch, Nuova Zelanda 2011

Cosa dicono le norme italiane (NTC_2018)?

7.11.3.4 STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

7.11.3.4.1 Generalità

Il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

In assenza di interventi di miglioramento del terreno, l'impiego di fondazioni profonde richiede comunque la valutazione della riduzione della capacità portante e degli incrementi delle sollecitazioni indotti nei pali.

.....

.....

7.11.3.4.3 Metodi di analisi

Quando nessuna delle condizioni del § 7.11.3.4.2 risulti soddisfatta e il terreno di fondazione comprenda strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, occorre valutare il coefficiente di sicurezza alla liquefazione alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili.

Salvo utilizzare procedure di analisi avanzate, la verifica può essere effettuata con metodologie di tipo storico-empirico in cui il coefficiente di sicurezza viene definito dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione e la sollecitazione indotta dal terremoto di progetto. La resistenza alla liquefazione può essere valutata sulla base dei risultati di prove in sito o di prove cicliche di laboratorio. La sollecitazione indotta dall'azione sismica è stimata attraverso la conoscenza dell'accelerazione massima attesa alla profondità di interesse.

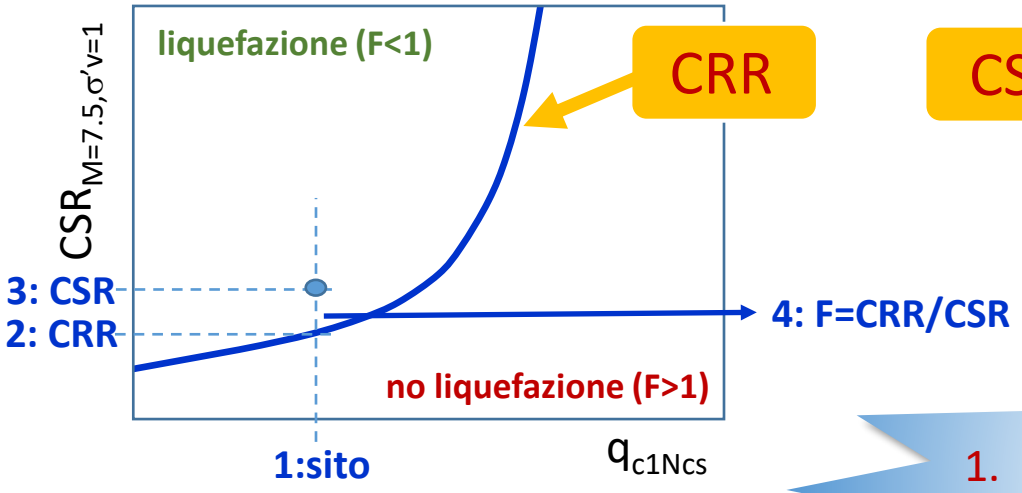
L'adeguatezza del margine di sicurezza nei confronti della liquefazione deve essere valutata e motivata dal progettista.

Verifica delle condizioni di sicurezza rispetto all'innesco della liquefazione

$$F_{liq,\ M=7.5,\ \sigma'v=1atm} = \frac{capacity}{demand} = \frac{CRR}{CSR_{M=7.5\ ,\sigma'v=1}}$$

← *Cyclic Resistance Ratio* τ_f/σ'

← *Cyclic Stress Ratio* τ_{eq}/σ'



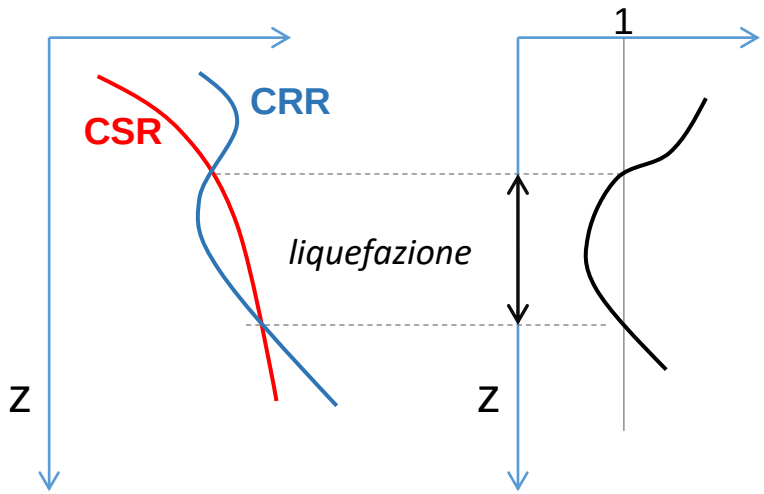
$$CSR = \frac{\tau_{eq}}{\sigma'_{v0}} = 0.65\frac{a_{max}}{g}\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}r_d$$

$$CSR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = \frac{CSR_{M,\sigma'_v}}{MSF \cdot K_\sigma}$$

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1atm} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.80\right)$$

1. Sono verifiche puntuali
2. Dicono solo se il terreno liquefa

Oltre le norme: quando preoccuparci?



$$FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR}$$

r_u?

Indicatori integrali

Liquefaction potential index I_L
(*Iwasaky et al., 1978*)

$$I_L = \int_0^{20} F_L(z) w(z) dz$$

Liquefaction Severity Number *LSN*
(*Van Ballegooy et al., 2014*)

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz$$

Induced dAmage paraMeter I_{AM}
(*Chiaradonna et al., 2020*)

$$I_{AM} = \frac{1}{(1+z_{min})^{0.3}} \cdot 0.003 \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{r_u(z)}{1-r_u(z)} dz$$

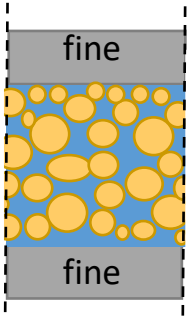
Suscettibilità alla liquefazione

Fattori predisponenti

✓ **Terreno e acqua**
- Densità
- Cementazione
- Distribuzione granulometrica
- Saturazione
- Drenaggio

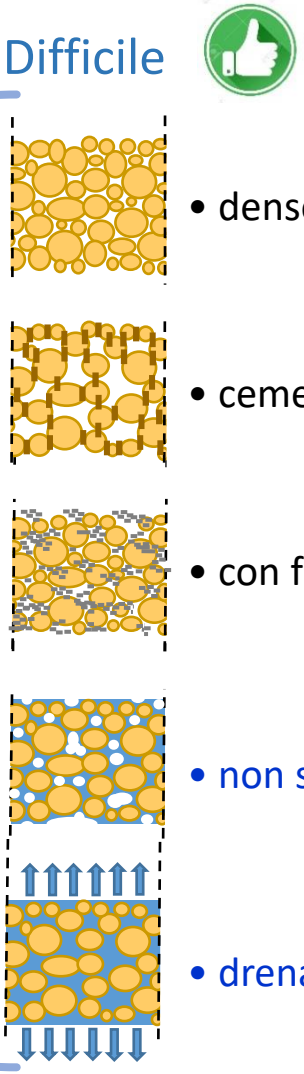
✓ **Stato tensionale**
- Basso (terreni superficiali)

Possibile



- sciolto
- non cementato
- con poco fine
- saturo
- non drenato

Difficile



- denso
- cementato
- con fine
- non saturo
- drenato

Possibili meccanismi di consolidamento dei terreni per la mitigazione dei rischio da liquefazione

Tecniche di mitigazione

Possibili tecniche di intervento

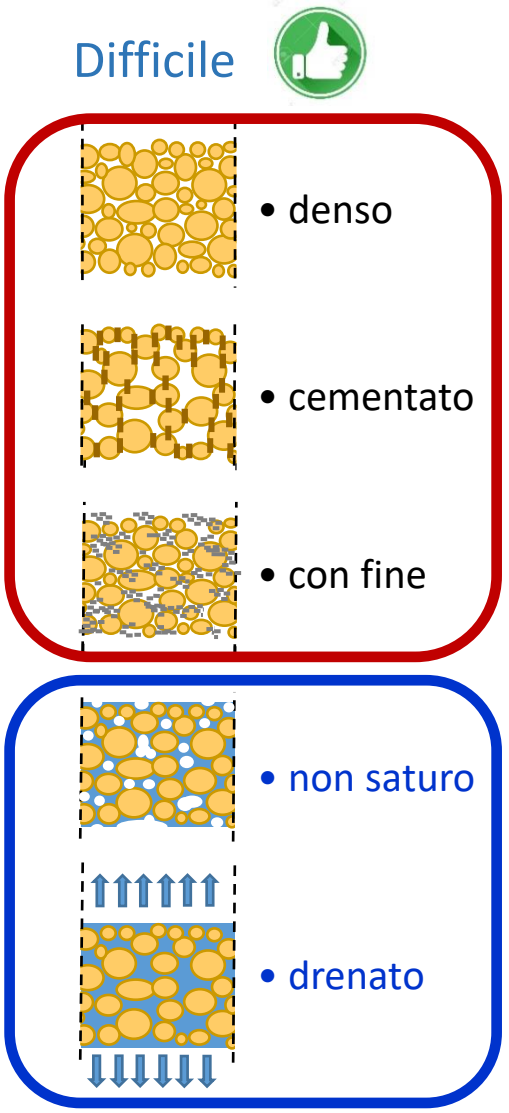
- Addensamento
- Cementazione
- Aggiunta di fine plastico
- Sistemi di drenaggio
- Desaturazione

Le tecniche che modificano lo stato del terreno (addensamento, cementazione e aggiunta di fine plastico) vengono dette ***indirette***

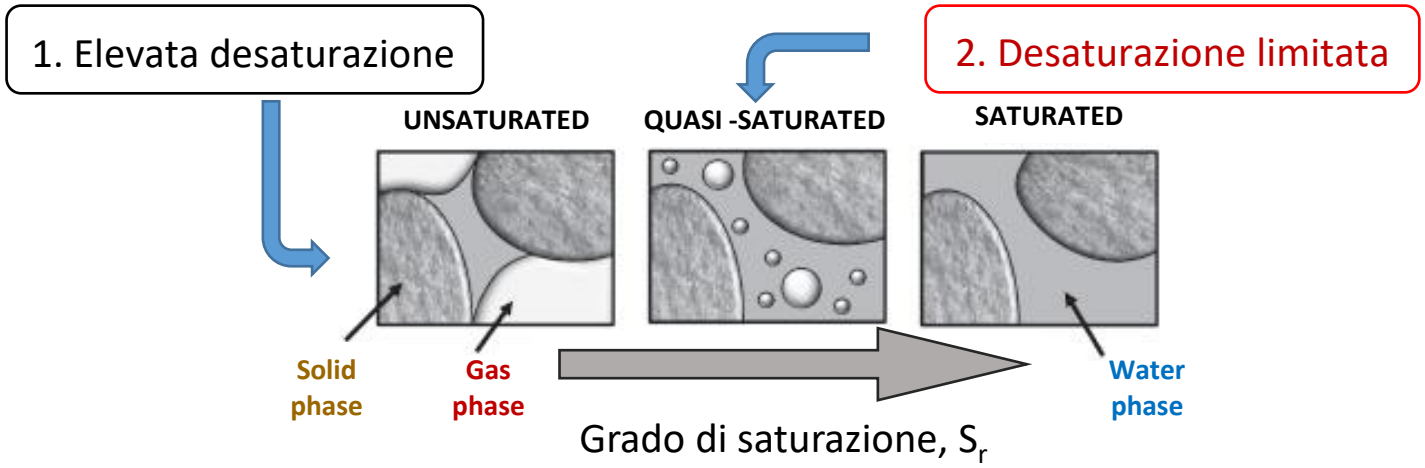
Le tecniche che intervengono sulla crescita delle sovrappressioni neutre (desaturazione e sistemi di drenaggio) vengono chiamate ***dirette***

Le tecniche che fanno entrambe le cose si definiscono ***miste***

Difficile



Cosa è la *Induced Partial Saturation* (IPS)?

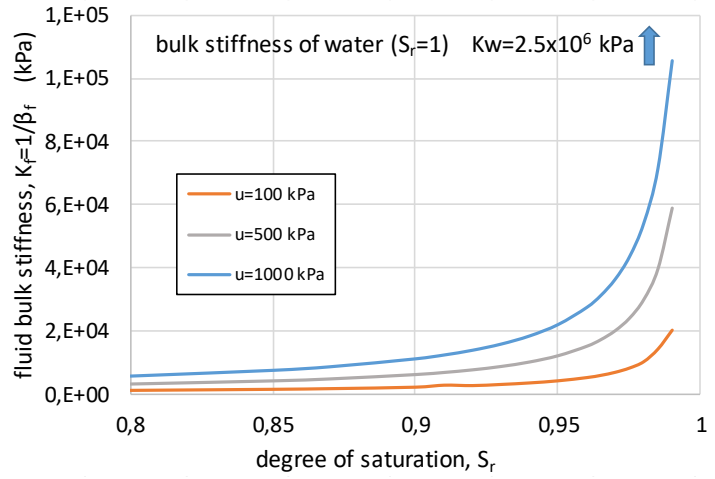


Perché funziona?

Per desaturazione limitata, la compressibilità β_f del fluido equivalente (acqua + bolle di gas) si reduce e può essere espresso come:

$$\beta_f = \frac{1 - S_r}{u + p_a} + \beta_w \cdot S_r$$

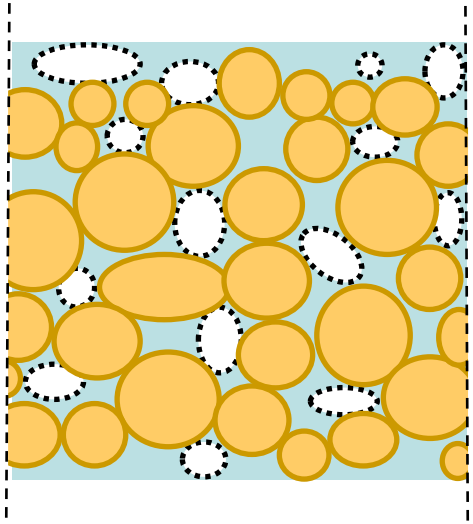
Mihalache and Buscarnera, 2016



Come si può ottenere la *Induced Partial Saturation* (IPS)?

Air Sparging

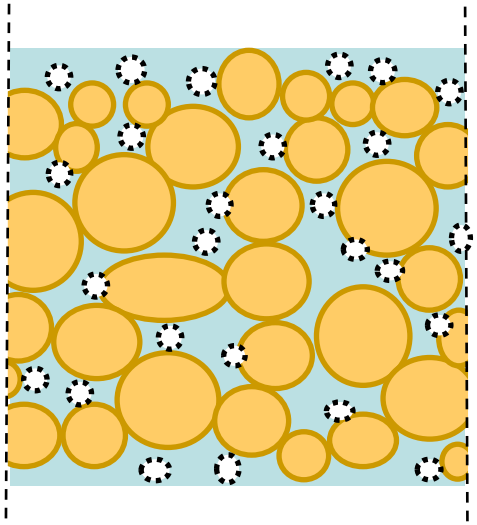
(iniezione di aria)



- Molto semplice da eseguire
- Disomogeneità distribuzione bolle
- Maggiore tendenza della singola bolla ad unirsi con altre

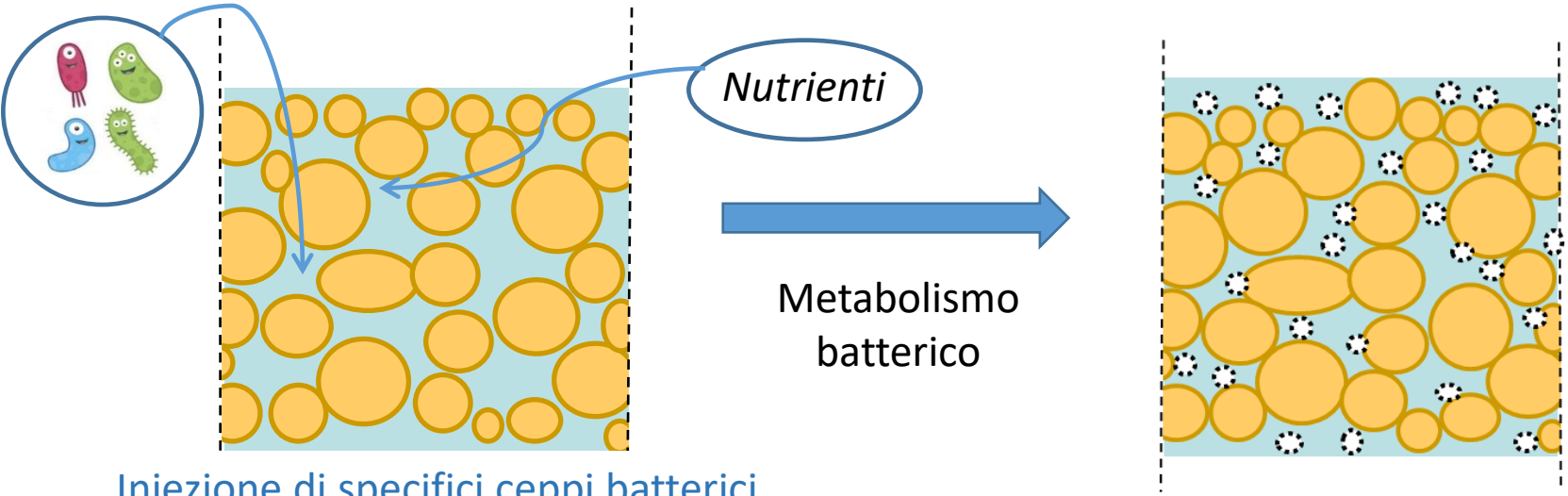
bio - IPS

(iniezione di miscela liquida con batteri)



- Nucleazione delle bolle (piccolissime) direttamente nel fluido di porosità
- Maggiore omogeneità distribuzione
- Minor tendenza della singola bolla a unirsi in bolle più grandi

Parziale Saturazione Indotta biomediata (bio IPS)



Iniezione di specifici ceppi batterici e nutrienti ecocompatibili all'interno dei pori

Nucleazione di micro bolle di gas

I batteri selezionati generano gas mediante processi di denitrificazione. Il metabolismo batterico porta alla formazione di N_2 in fase gassosa.

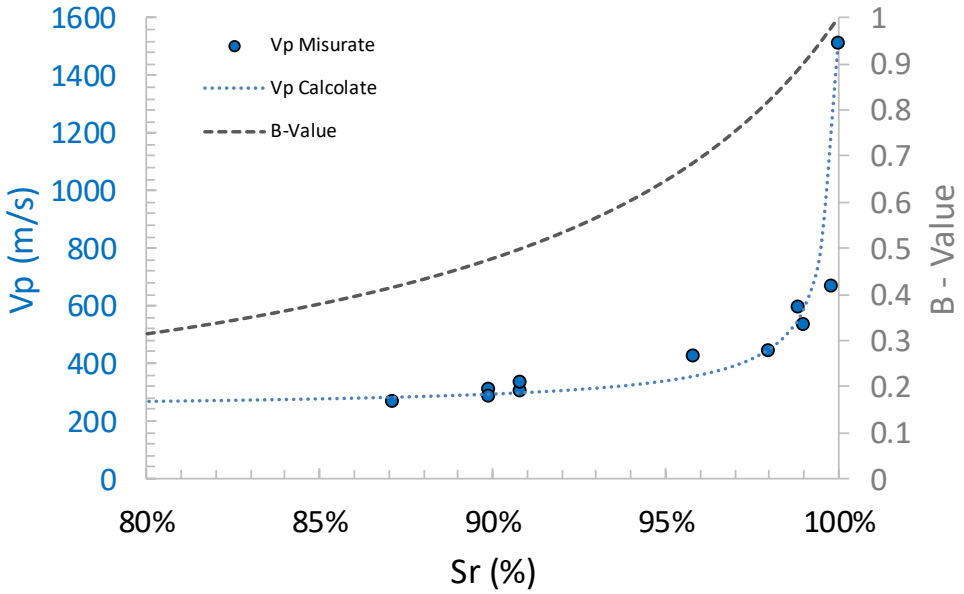
L'azoto molecolare ha i seguenti vantaggi:

- Bassa solubilità in acqua;
- Chimicamente inerte;
- Impatto ambientale nullo.

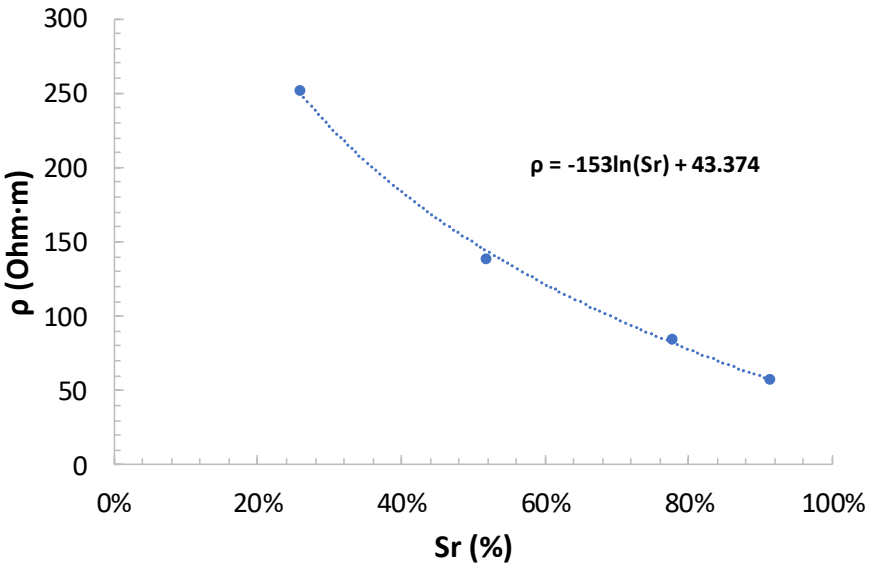
Astuto, 2021

Come misurare gli effetti del trattamento con bio IPS?

Velocità delle onde P (V_p)

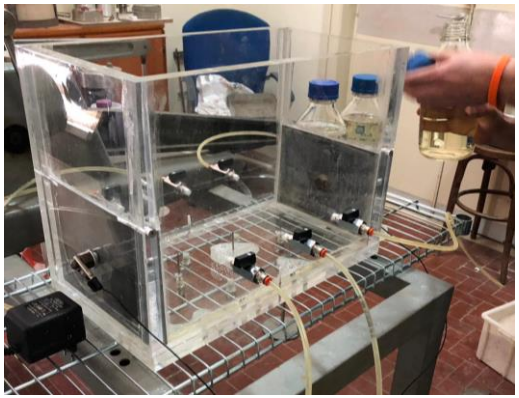


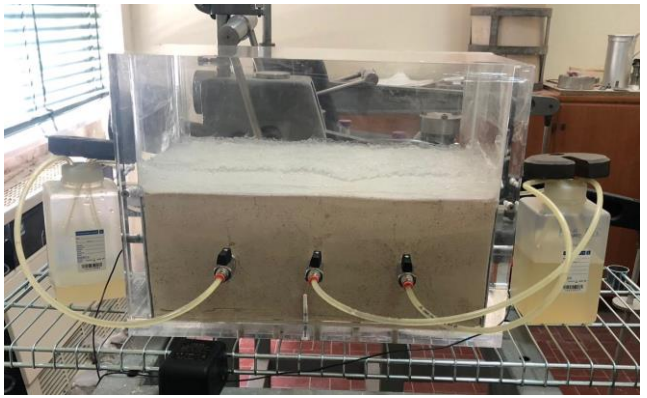
Resistività elettrica (ρ)

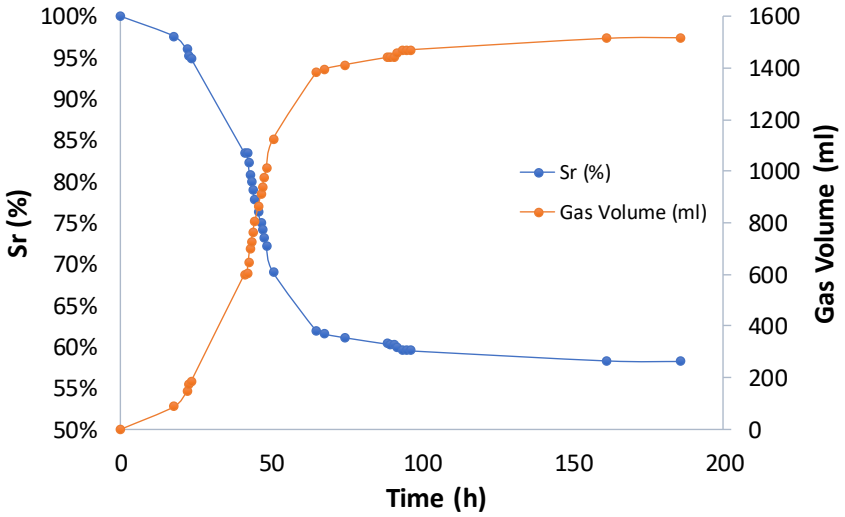


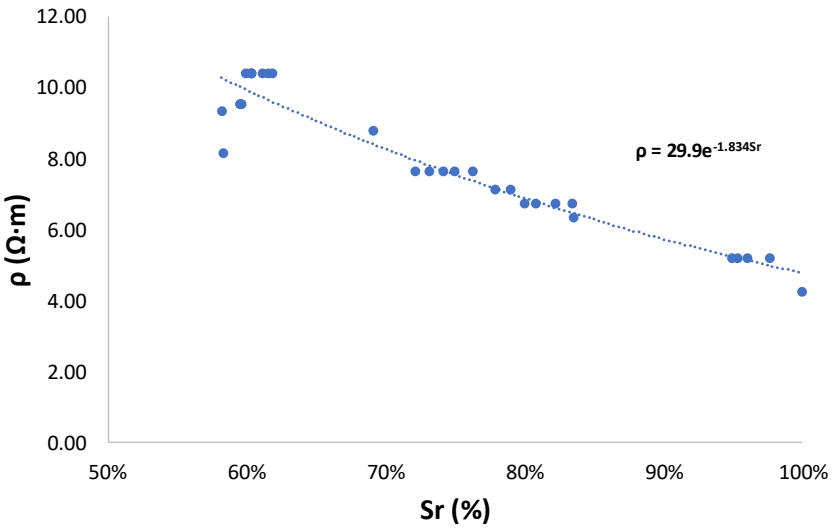
Astuto, 2021

Prove di laboratorio su modello









Astuto, 2021

Strumenti di calcolo per progettare l'intervento

Verifiche di norma

Con la verifica $F_{liq,ff}$=CRR/CSR sappiamo se il terreno liquefa o meno.

1

- Quale è il rapporto di sovrapressione neutra $r_{u,ff}$ per $F_{liq,ff}>1$ ($S_r=1$)?

Verifiche per il progetto dell'IPS

Dobbiamo avere strumenti sia per $F_{liq}<F_{liq,min}$ sia per il caso $F_{liq}\geq F_{liq,min}$ e $r_u \geq r_{u,max}$.

2

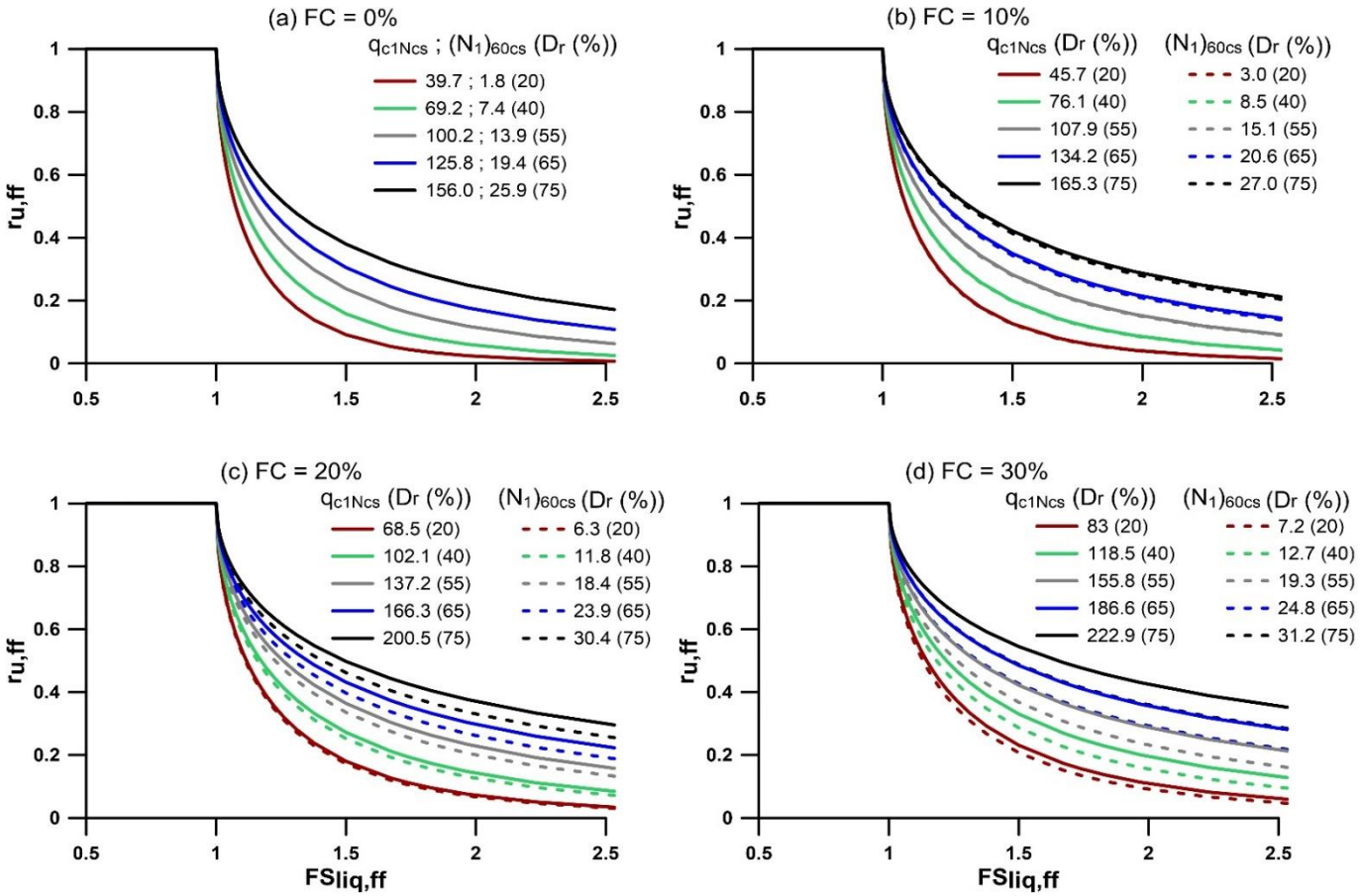
- Quale è l'effetto di $S_r<1$ su $F_{liq,ff}$?

3

- Quanto vale $r_{u,ff}$ per $F_{liq,ff}>1$ e $S_r<1$?

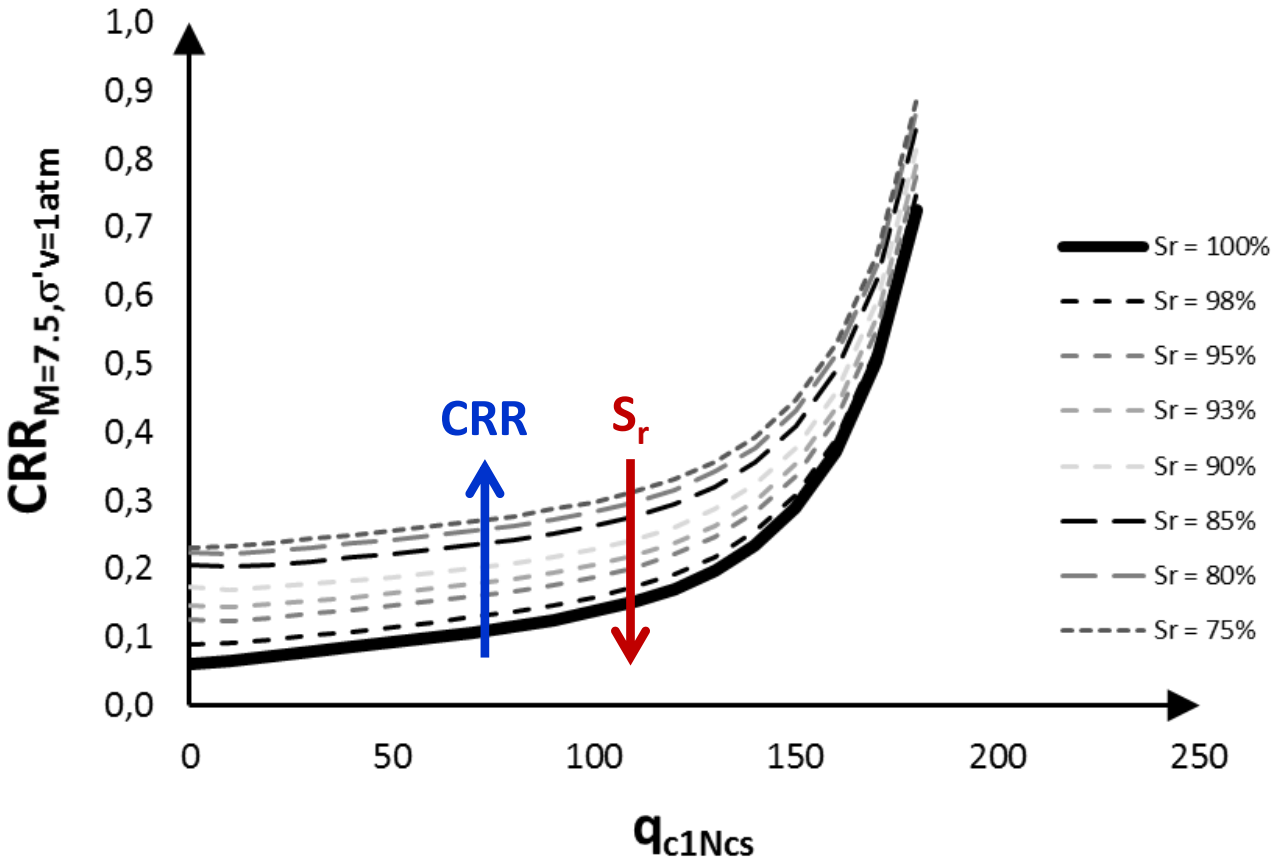
1

Legame tra r_u e F_{liq} per terreni saturi



Chiaradonna and Flora, 2019

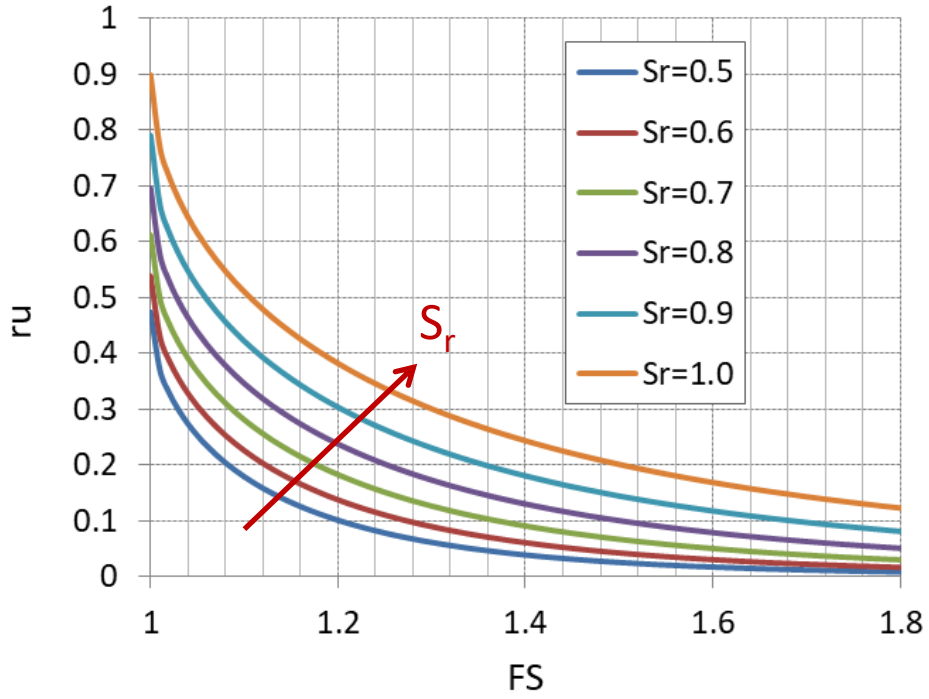
2 Effetto della desaturazione sulla resistenza ciclica del terreno



Flora et al., 2020

3

Legame tra r_u e F_{liq} per terreni non saturi



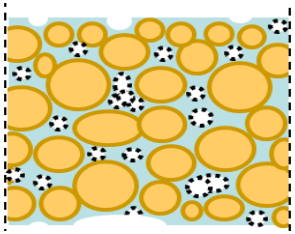
D_r=40%

$$F_{liq} \geq 1, \qquad S_r \leq 100\%$$

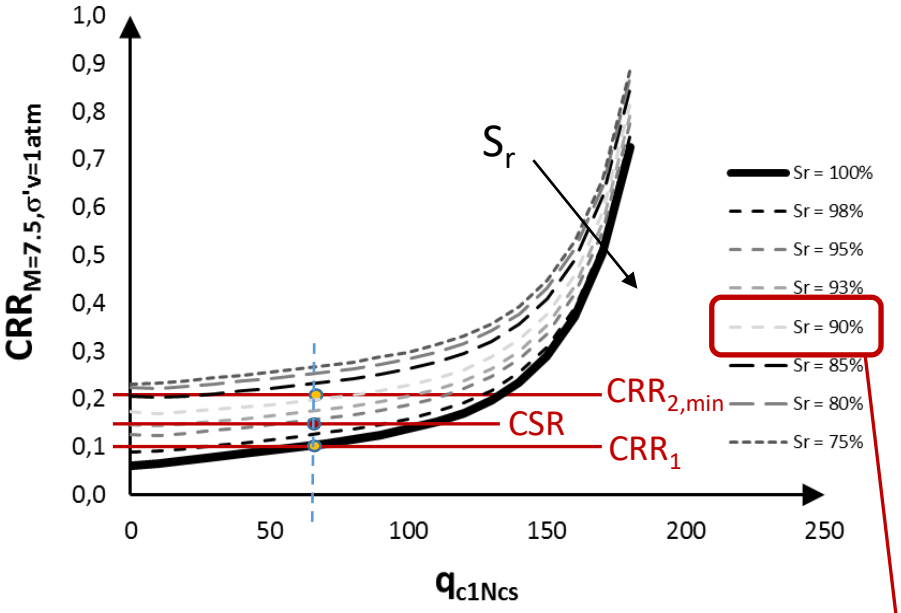
Mele et al., 2021

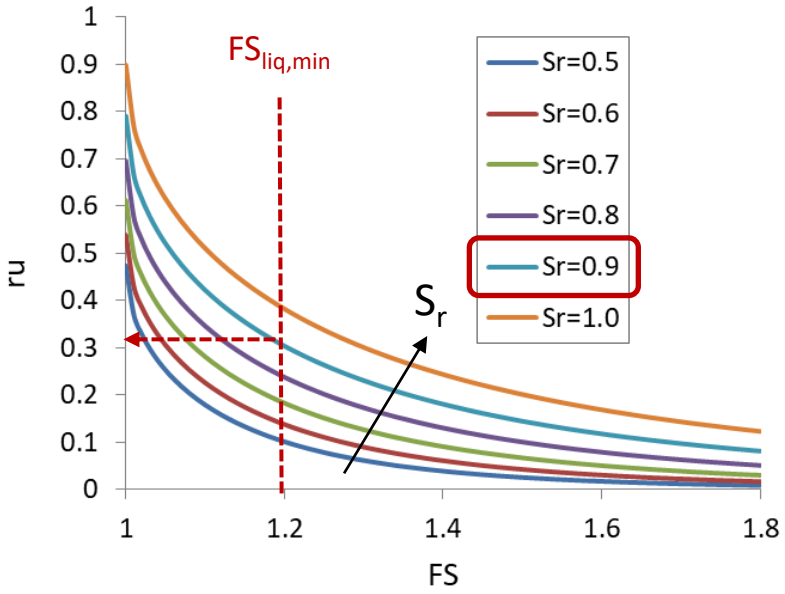
Progetto di un intervento con IPS

L'IPS riduce la tendenza del fluido di porosità ad accumulare sovrappresioni neutre.



Quale è il valore di S_r da raggiungere se $F_{liq}<F_{liq,min}$?





Valore di progetto di S_r

Conclusioni …

- ✓ L'accumulo di sovrappressioni neutre in terreni saturi durante eventi sismici può dare luogo a fenomeni parossistici (liquefazione) ma indurre danni severi al patrimonio costruito anche in assenza di liquefazione.
- ✓ E' necessario cautelarsi quindi non solo rispetto al rischio liquefazione, ma in generale rispetto all'accumulo di sovrappressioni neutre, la cui stima è quindi il vero elemento di interesse ingegneristico.
- ✓ La *Induced Partial Saturation* (IPS) biomediata è una tecnica molto efficace, semplice, economica ed ecocompatibile adatta ad essere utilizzata anche in presenza di costruzioni esistenti.

… domande sull'IPS a cui rispondere …

- ✓ Per quanto tempo permangono le bolle di gas nel terreno? Quanto vivono i microrganismi nel terreno?
- ✓ Riusciamo a stimare con affidabilità S_r alla scala del sito?

… e quindi cose da fare

- ✓ Nuovi campi prova **(ma per questo, servono finanziamenti!)**

grazie per l’attenzione