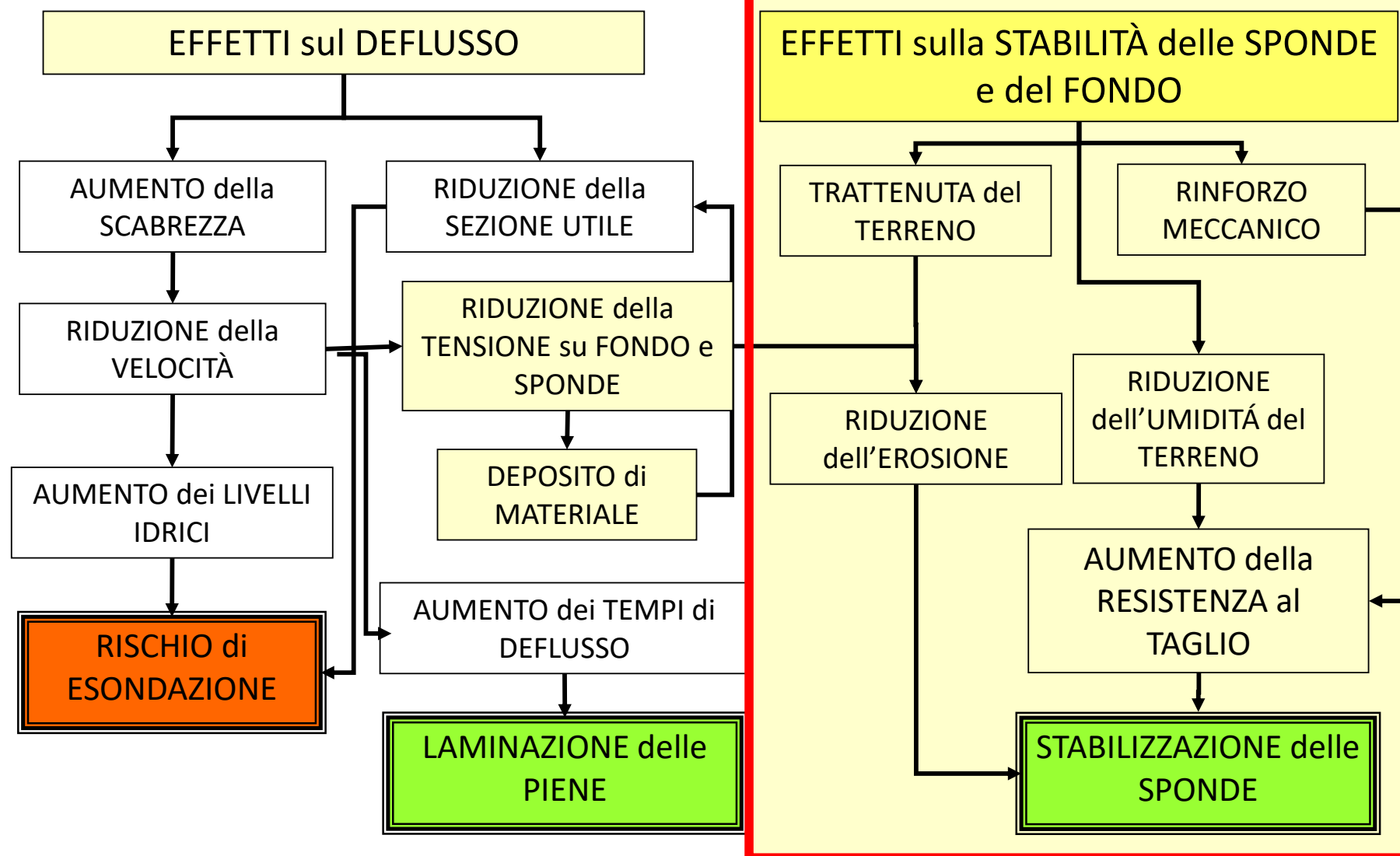


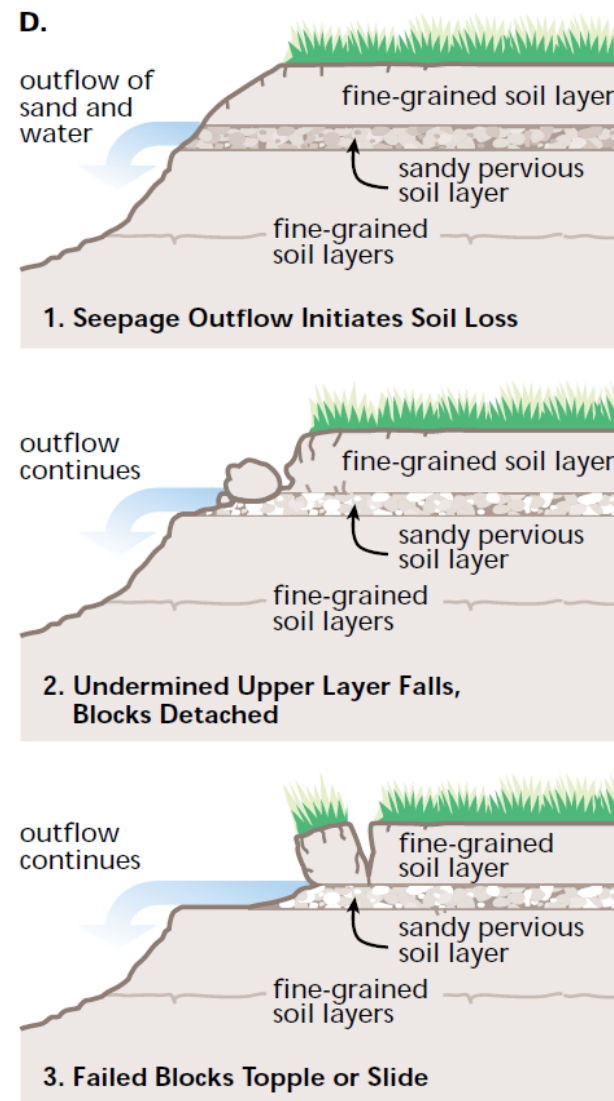
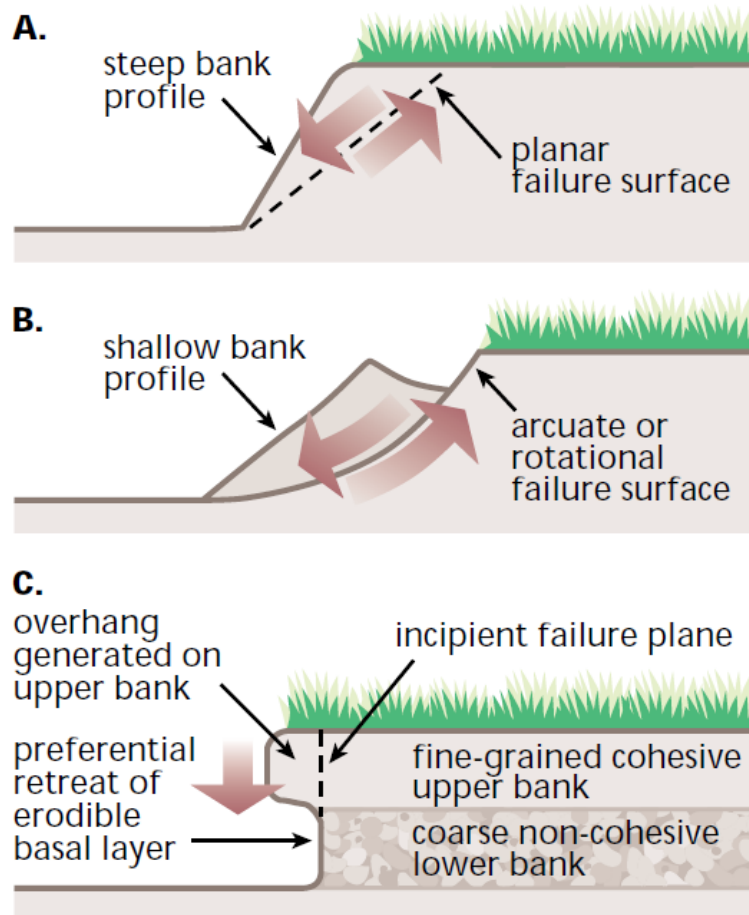
VERIFICA DELLA STABILITÀ DI SPONDA E DI VERSANTE

Dott. Ing. Alessio CISLAGHI
DiSAA – Ingegneria Agraria
Via Celoria, 2 – 20133 Milano
Tel. 02-503-16903



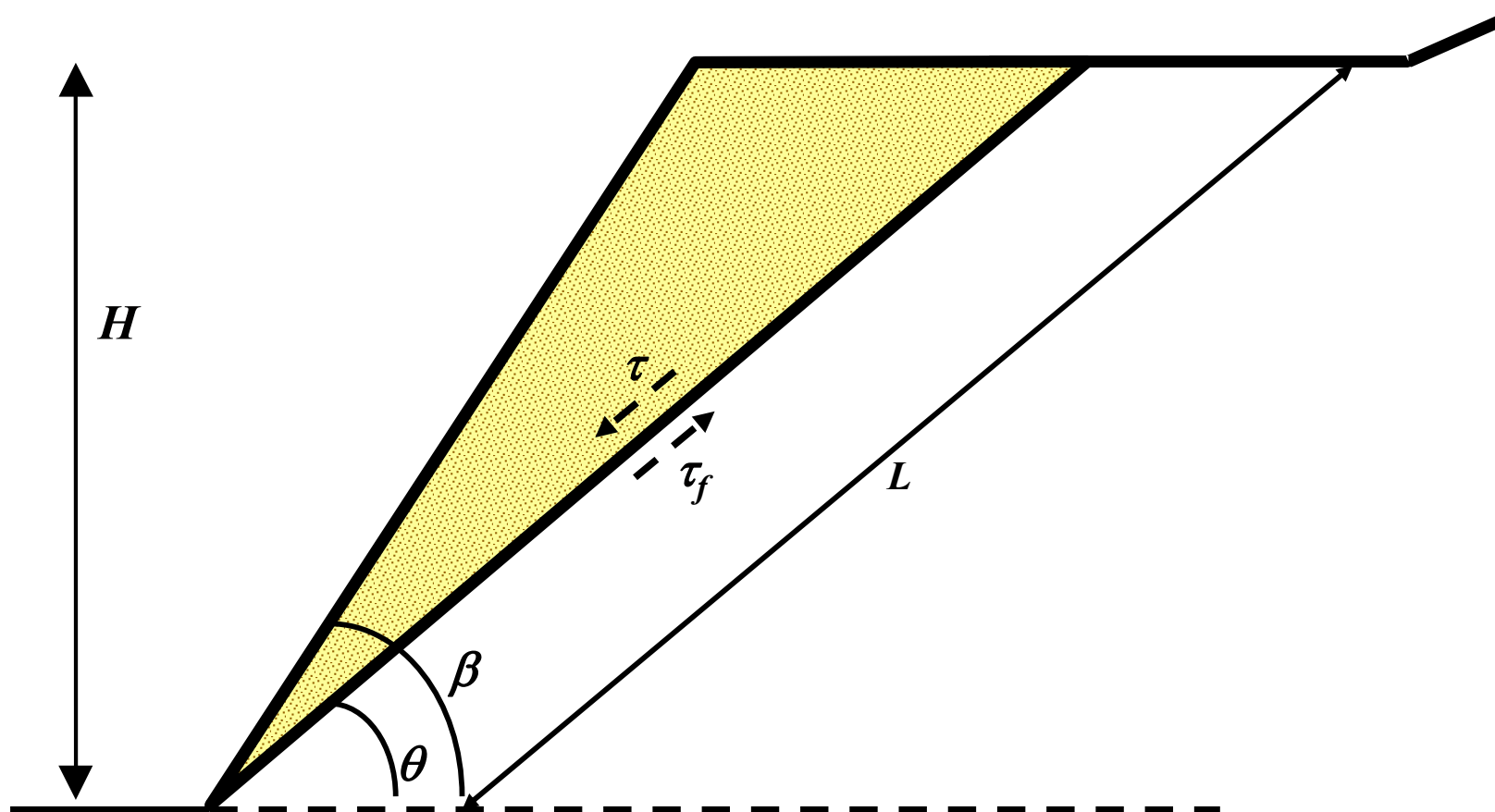
Valutazione della stabilità della sponda

- Instabilità di sponda.

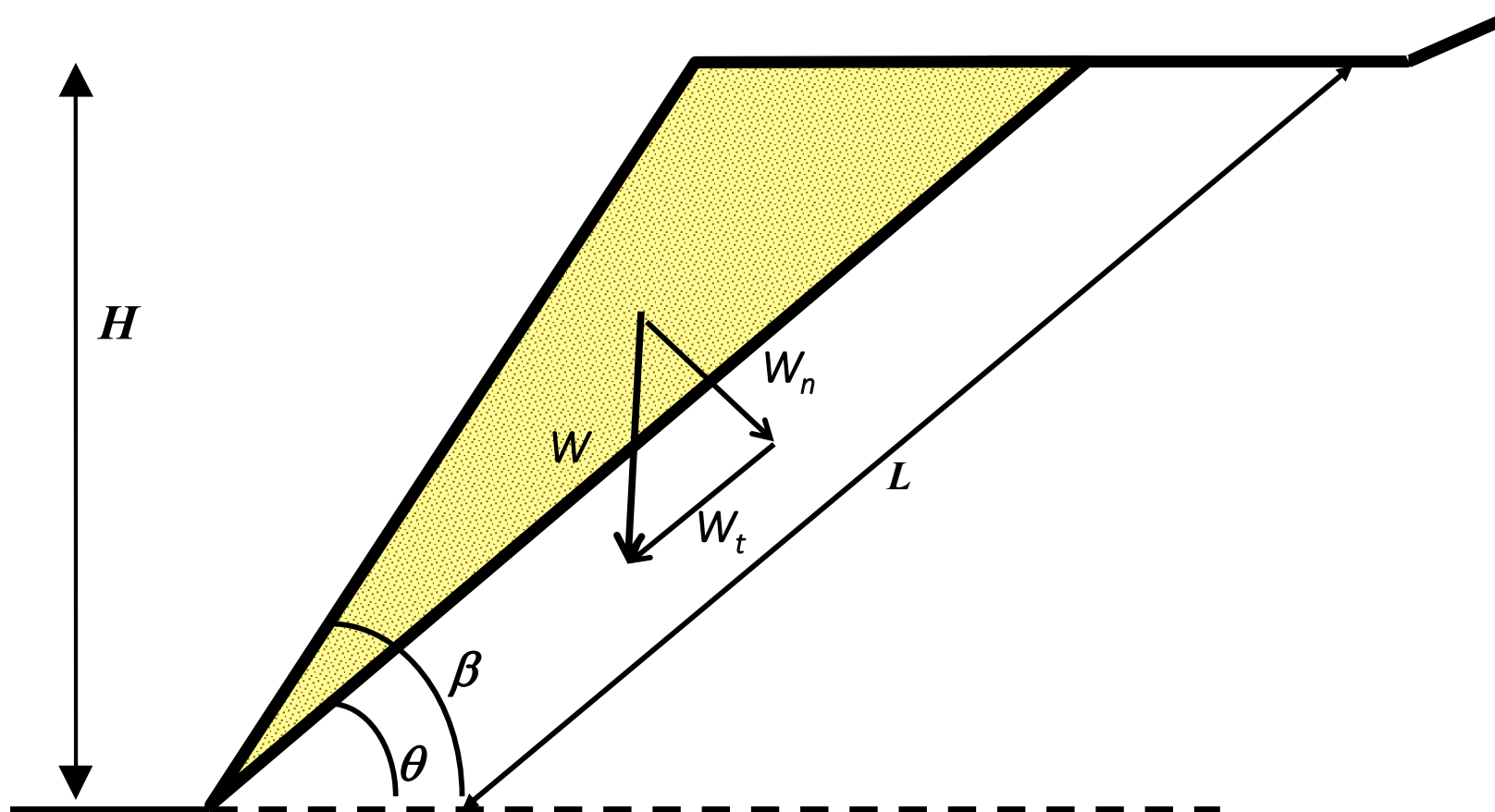


FISRWG (10/1998). Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG)(15 Federal agencies of the US gov't). GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653. ISBN-0-934213-59-3.

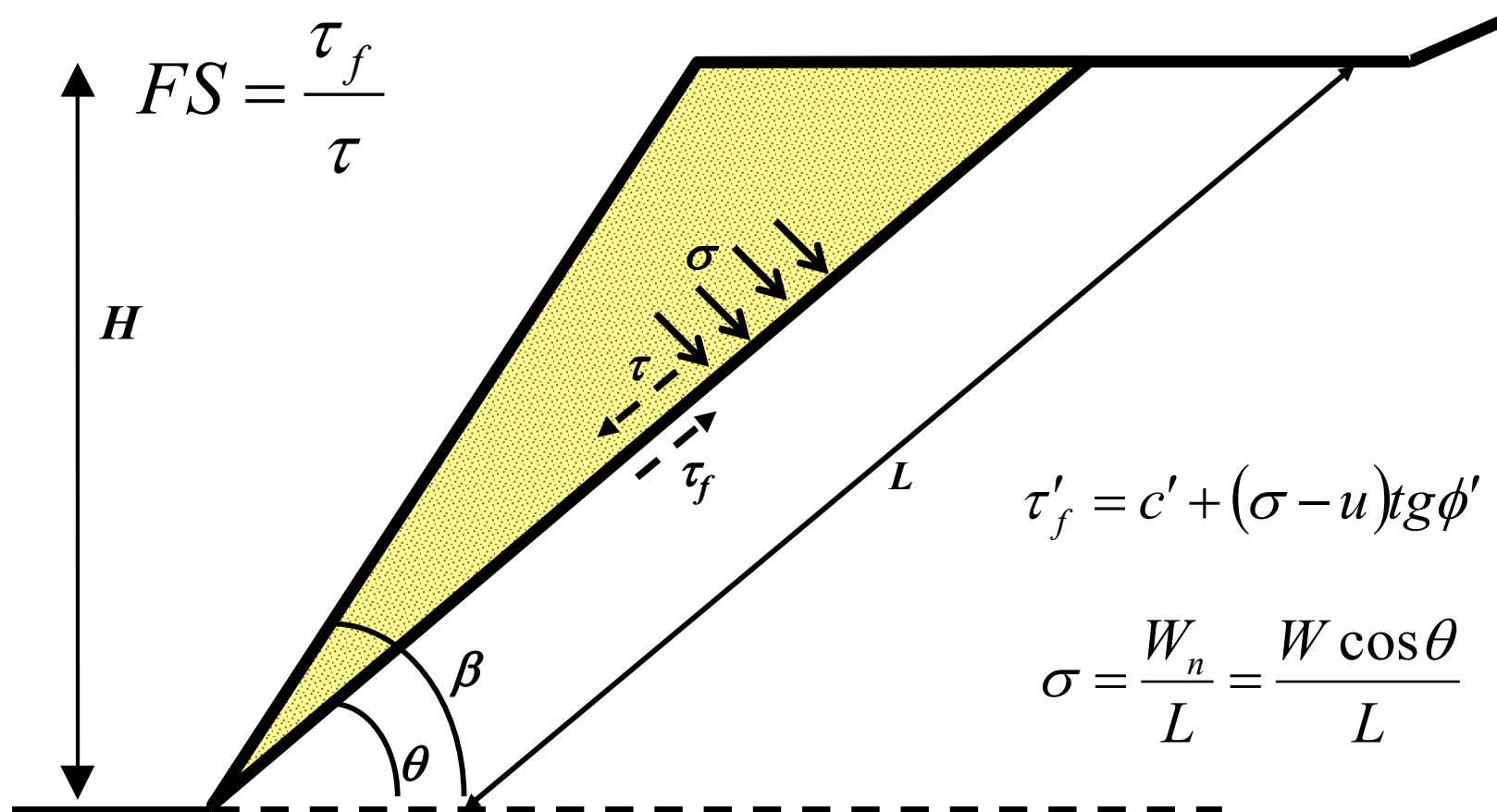
- Modello del cuneo.



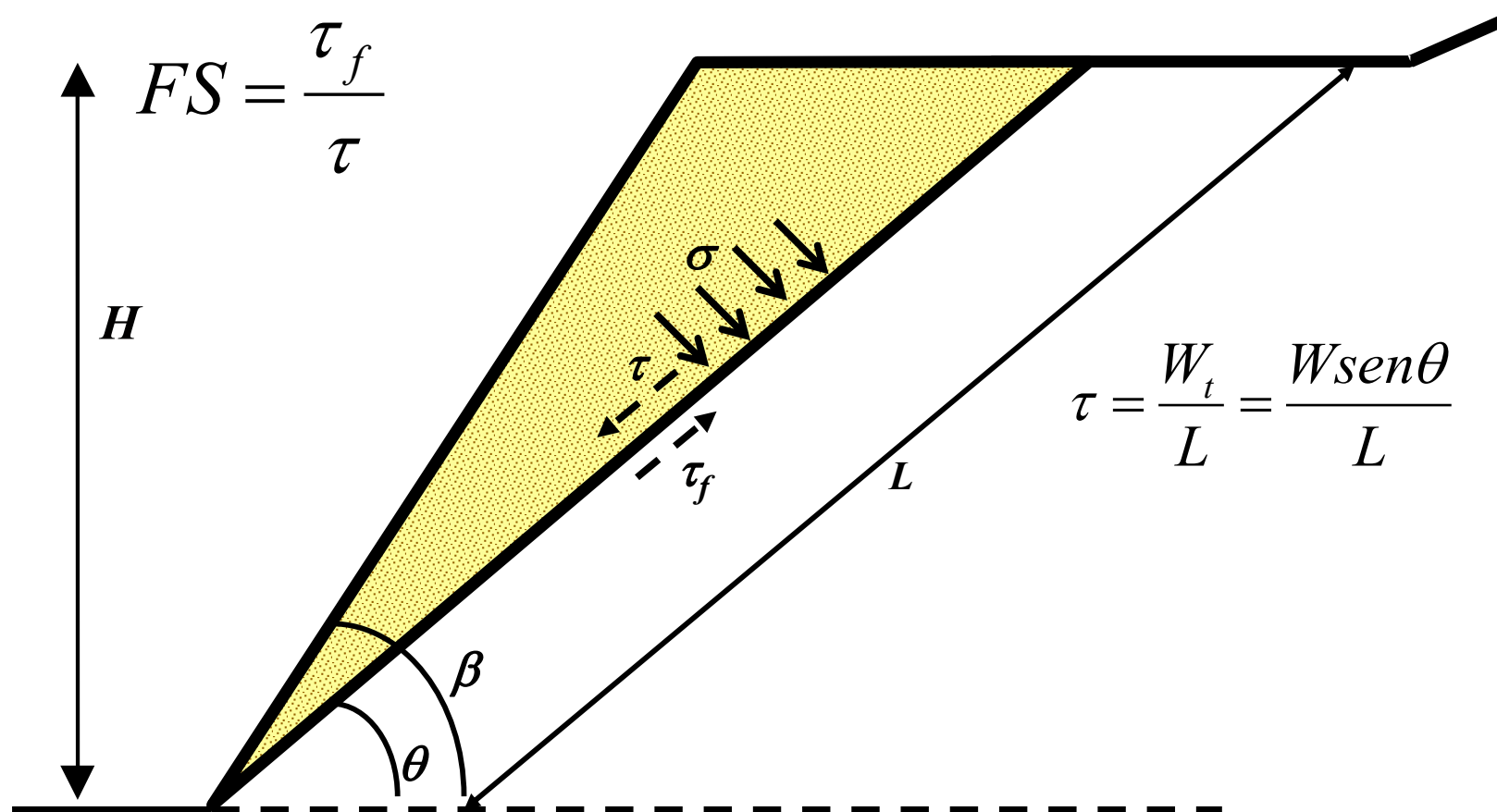
- Modello del cuneo.



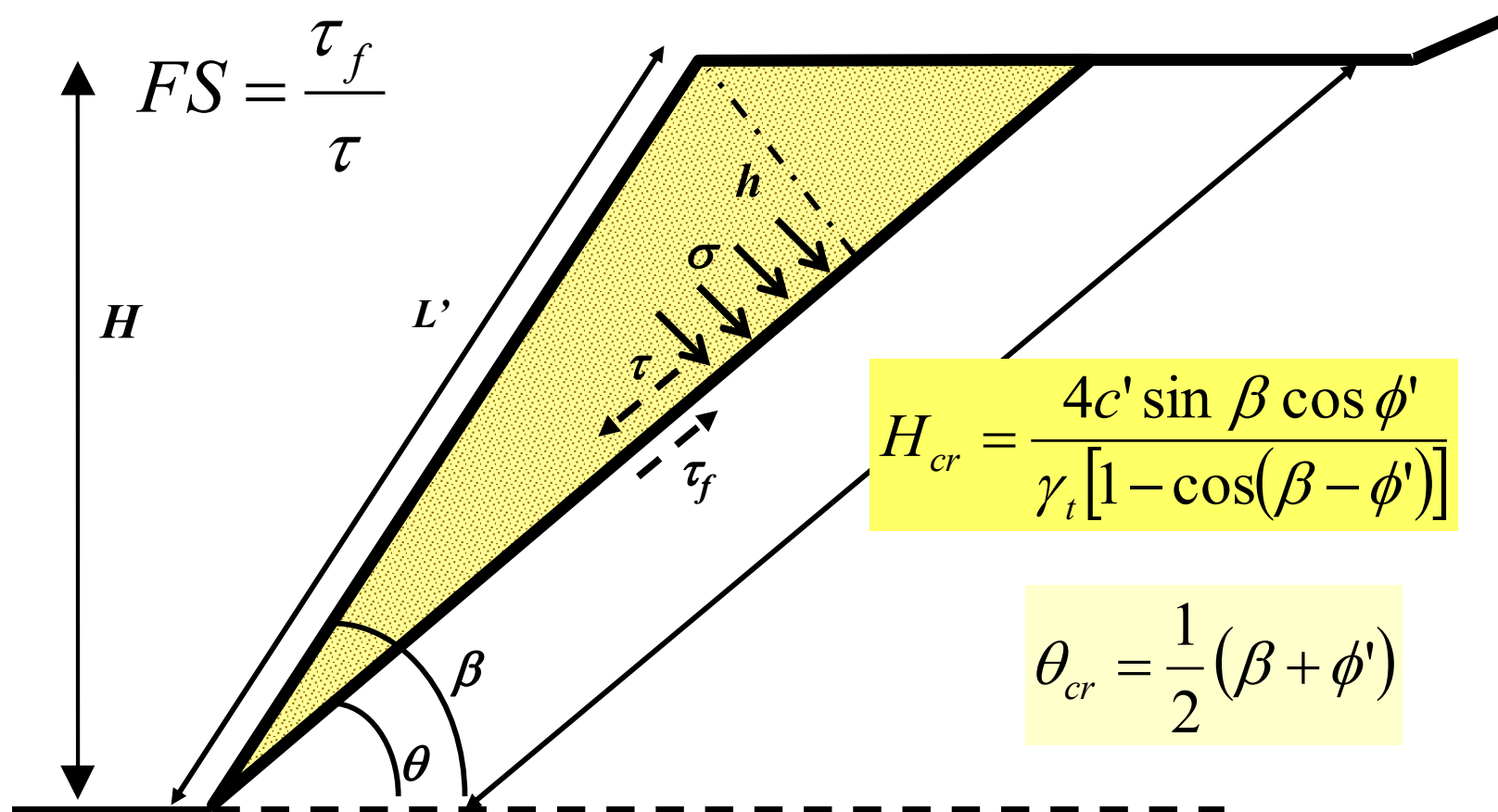
- Modello del cuneo.



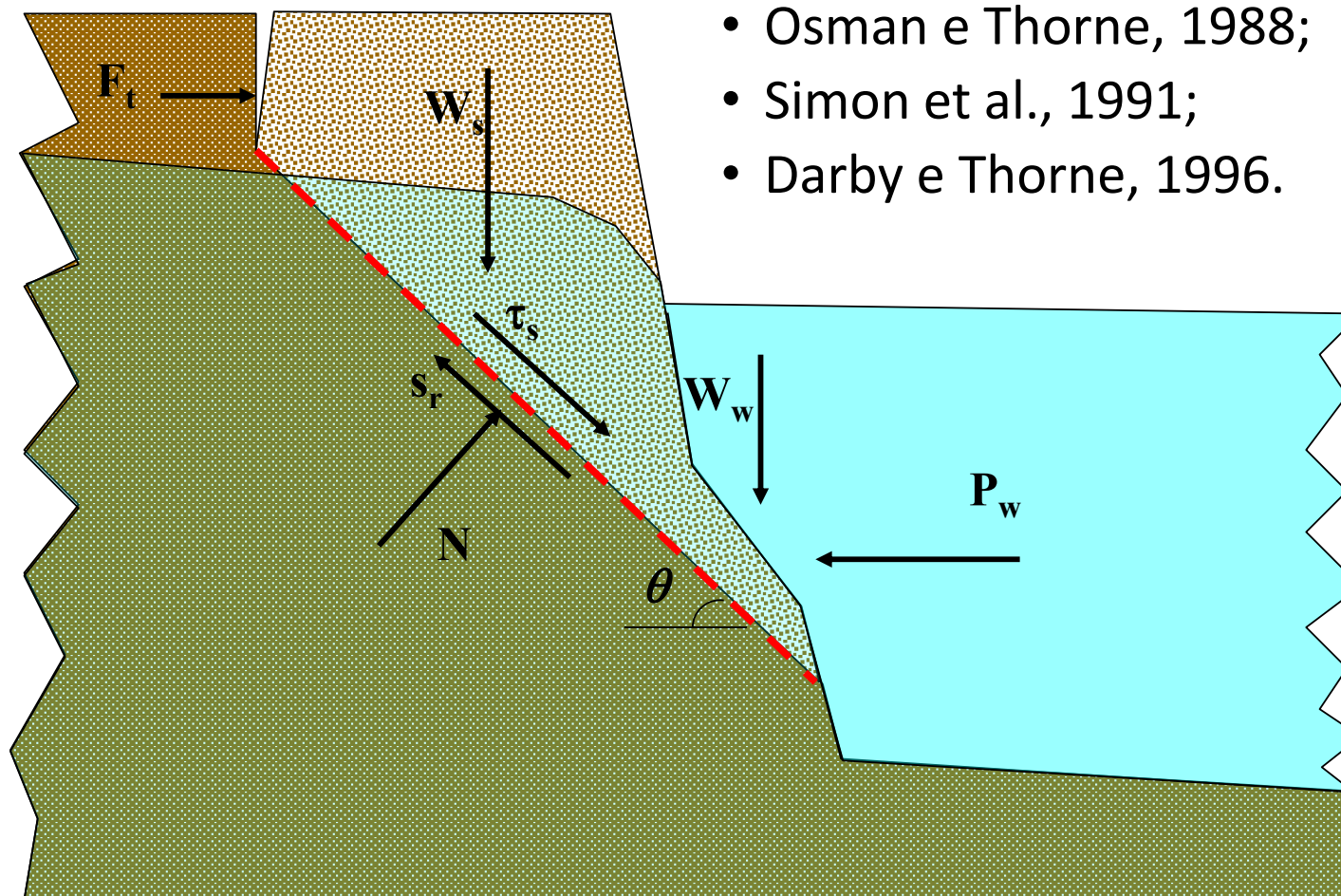
- Modello del cuneo.



- Modello del cuneo.



- Modelli più complessi



- Osman e Thorne, 1988;
- Simon et al., 1991;
- Darby e Thorne, 1996.

- Modelli più complessi -> BSTEM

Bank Stability and Toe Erosion Model

Static Version 5.4

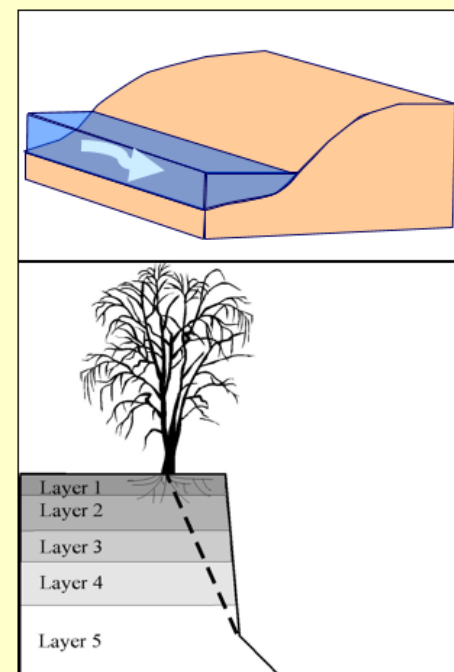
Bank Stability Model

The Bank Stability Model combines three limit equilibrium-method models that calculate Factor of Safety (F_s) for multi-layer streambanks. The methods simulated are horizontal layers (Simon *et al.*, 2000), vertical slices with tension crack (Langendoen and Simon, 2008) and cantilever failures (Thorne and Tovey, 1981). The model can easily be adapted to incorporate the effects of geotextiles or other bank stabilization measures that affect soil strength.

The model accounts for the strength of up to five soil layers, the effect of pore-water pressure (both positive and negative (matric suction)), confining pressure due to streamflow and soil reinforcement and surcharge due to vegetation.

Input the bank coordinates (**Input Geometry**) and run the geometry macro to set up the bank profile, then input your soil types, vegetation cover and water table or pore-water pressures (**Bank Material, Bank Vegetation and Protection** and **Bank Model Output**) to find F_s .

The bank is said to be 'stable' if F_s is greater than 1.3, to provide a safety margin for uncertain or variable data. Banks with a F_s value between 1.0 and 1.3 are said to be 'conditionally stable', i.e. stable but with little safety margin. Slopes with an F_s value less than 1.0 are unstable.



Valutazione della stabilità di un versante

Norme Tecniche delle Costruzioni NTC - 2018

6.3.4. VERIFICHE DI SICUREZZA

Le verifiche di sicurezza devono essere effettuate con metodi che tengano conto del tipo di frana e dei possibili cinematismi, considerando forma e posizione della eventuale superficie di scorrimento, le proprietà meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi e il regime delle pressioni interstiziali.

Nel caso di pendii in frana le verifiche di sicurezza devono essere eseguite lungo le superfici di scorrimento che meglio approssimano quella/e riconosciuta/e con le indagini.

Negli altri casi, la verifica di sicurezza deve essere eseguita lungo superfici di scorrimento cinematicamente possibili, in numero sufficiente per ricercare la superficie critica alla quale corrisponde il grado di sicurezza più basso.

Quando sussistano condizioni tali da non consentire una agevole valutazione delle pressioni interstiziali, le verifiche di sicurezza devono essere eseguite assumendo le condizioni più sfavorevoli che ragionevolmente si possono prevedere.

La valutazione del coefficiente di sicurezza dei pendii naturali, espresso dal rapporto tra la resistenza al taglio disponibile (τ_f) e la tensione di taglio agente (τ) lungo la superficie di scorrimento, deve essere eseguita impiegando sia i parametri geotecnici, congruenti con i caratteri del cinematismo atteso o accertato, sia le azioni presi con il loro valore caratteristico.

L'adeguatezza del margine di sicurezza ritenuto accettabile dal progettista deve comunque essere giustificata sulla base del livello di conoscenze raggiunto, dell'affidabilità dei dati disponibili e del modello di calcolo adottato in relazione alla complessità geologica e geotecnica, nonché sulla base delle conseguenze di un'eventuale frana.

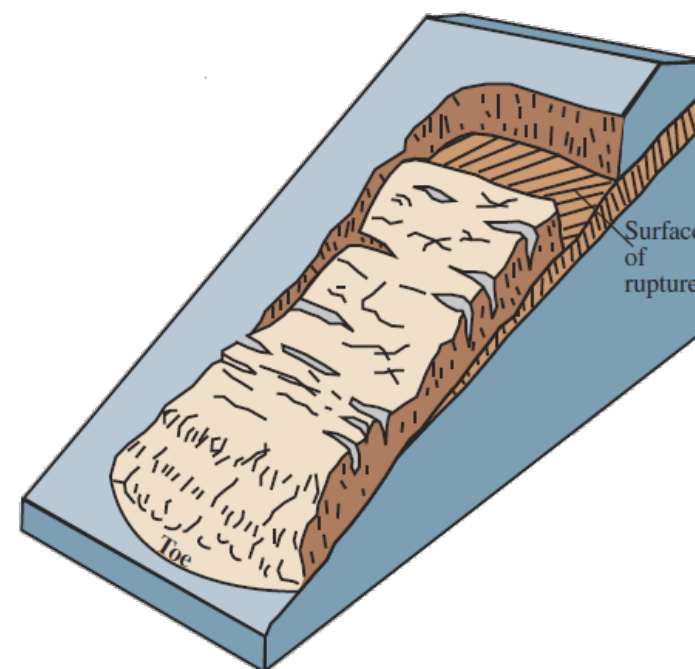
Classificazione dei movimenti dovuti all'instabilità dei versanti

TIPO DI MOVIMENTO		TIPO DI MATERIALE		
		<i>terra (earth)</i>	<i>detrito (debris)</i>	<i>roccia (rock)</i>
crolli (falls)		crollo di terra	crollo di detrito	crollo di roccia
ribaltamenti (topples)		ribaltamenti di terra	ribaltamenti di detrito	ribaltamenti di roccia
scivolamenti (slides)	rotazionali	scivolamenti rotazionali di terra	scivolamenti rotazionali di detrito	scivolamenti rotazionali di roccia
	traslativi	scivolamenti traslazionali di terra	scivolamenti traslazionali di detrito	scivolamenti traslazionali di roccia
espandimenti laterali (lateral spreads)		espandimenti laterali di terra	espandimenti laterali di detrito	espandimenti laterali di roccia
colamenti o flussi (flows)		colata di terra	colata di detrito	flusso in roccia
frane complesse (complex)		combinazione di due o più tipi di movimento		

Movimenti traslazionali

Presenta superfici di scivolamento pressoché piane, che si verificano in corrispondenza di una discontinuità nel substrato.

Avviene in versanti dove vi siano influenze di tipo geologico interessando profondità rilevanti (decine di metri) o più frequentemente su versanti boscati con coperture colluviali di modesta profondità (pochi metri).



Translational landslide



Fonte: Massimiliano Bordoni, UNIPV



Fonte: Giulia Arianna Premoli

Il metodo del pendio indefinito si basa sulle seguenti ipotesi:

- frane di scorrimento dove l'influenza delle forze agenti sulle porzioni di sommità e di piede è trascurabile (coltri di terreno alluvionale o detritico);
- frane di scorrimento con uno spessore molto limitato rispetto alla lunghezza della frana ($\text{lunghezza/spessore} > 25$);
- frane poste su un terreno di fondazione più rigido;
- terreno asciutto ed incoerente (pendii naturali).

Il metodo del pendio indefinito

si basa sul criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

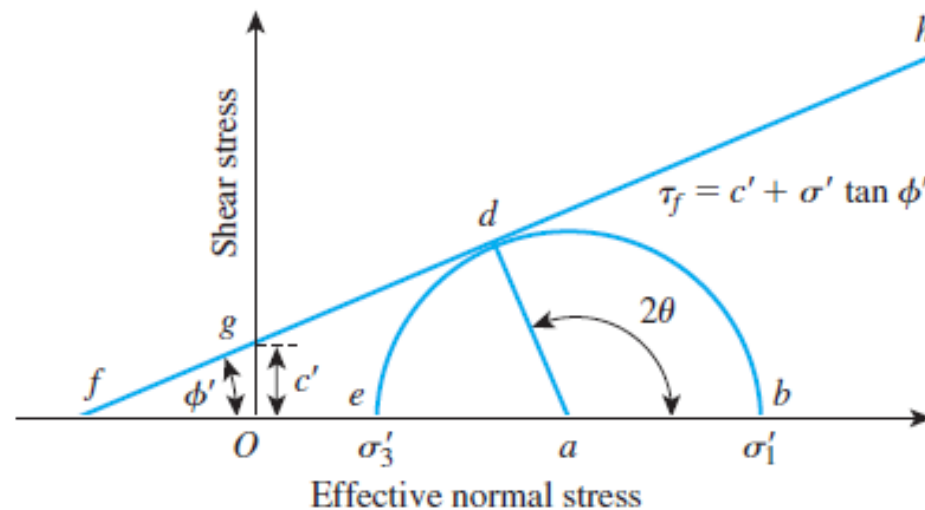


Figure 12.3 Mohr's circle and failure envelope

Rappresentando le generiche condizioni di equilibrio di un **generico concio** di terreno delimitato da due superfici verticali e da un piano alla base corrispondente alla superficie di rottura, parallelo alla superficie del versante,

si può definire il **fattore di sicurezza (FS)** come il rapporto tra gli sforzi resistenti (τ_f) e quelli destabilizzanti (τ).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau}$$

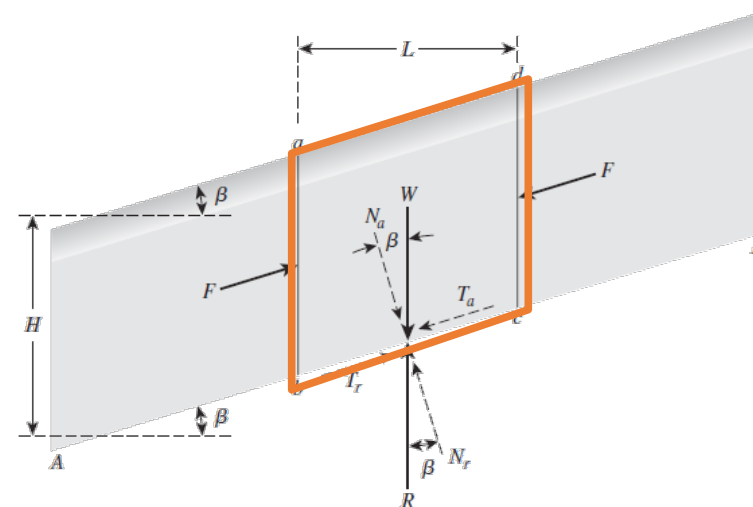


Figure 15.7 Analysis of infinite slope (without seepage)

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau}$$

$$[W = \gamma LH]$$

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' = \frac{N}{LH / \cos \beta} \tan \phi' = \frac{W \cos \beta \tan \phi'}{LH / \cos \beta}$$

$$\tau = \frac{W \sin \beta}{LH / \cos \beta}$$

$$FS = \frac{W \cos \beta \tan \phi'}{W \sin \beta} = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

$$\phi' = \beta$$

$$FS = 1$$

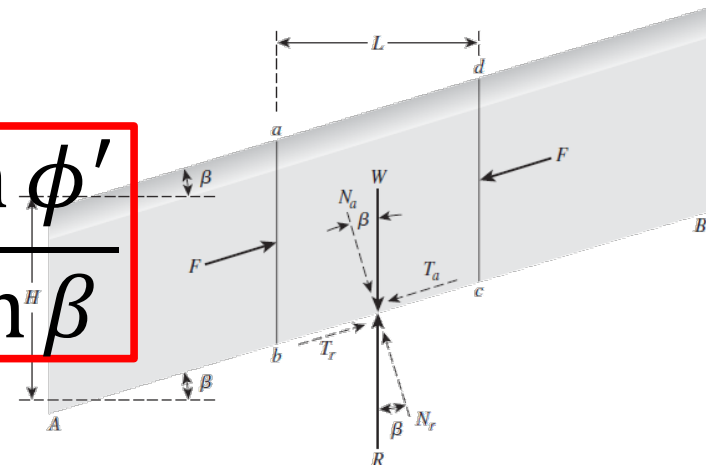


Figure 15.7 Analysis of infinite slope (without seepage)

$$\phi' = \beta \quad FS = 1 \quad ?$$



Tuttavia, in pendii naturali stabili, può verificarsi che $\beta > \phi'$ per effetto della capillarità del suolo, della cementazione delle particelle di terreno e della presenza delle radici.

- frane di scorrimento dove l'influenza delle forze agenti sulle porzioni di sommità e di piede è trascurabile (coltri di terreno alluvionale o detritico);
- frane di scorrimento con uno spessore molto limitato rispetto alla lunghezza della frana;
- frane poste su un terreno di fondazione più rigido;
- terreno asciutto ed incoerente (pendii naturali).
- coltre di terreno omogeneo, coesivo, su un substrato roccioso, permeabile, soggetto a piogge prolungate che producono un moto di filtrazione parallelo al pendio.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\tau}$$

$$\sigma = [(1 - m)\gamma + m\gamma_{sat}] H \cos^2 \beta$$

$$u = m H \gamma_w \cos^2 \beta$$

$$\tau = [(1 - m)\gamma + m\gamma_{sat}] H \sin \beta \cos \beta$$

$$FS = \frac{c' + [(1 - m)\gamma + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)] H \cos^2 \beta \tan \phi'}{[(1 - m)\gamma + m\gamma_{sat}] H \sin \beta \cos \beta}$$

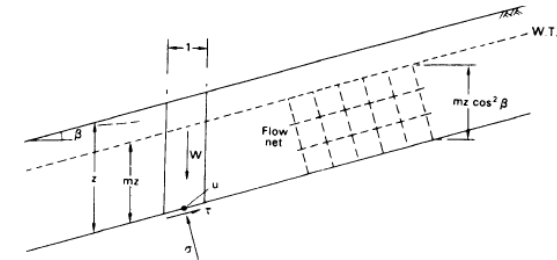


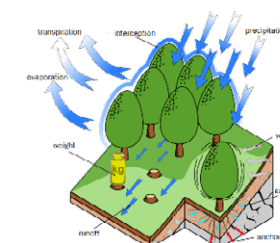
Figure 9.7 Plane translational slip.

Fonte: Massimiliano Bordoni, UNIPV

Cosa trascura la geotecnica classica?

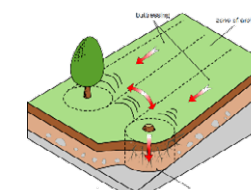


Fonte: Chris Phillips



MECCANISMI IDROLOGICI:

- (1) intercettazione
- (2) traspirazione
- (3) Riduzione di umidità nel suolo



MECCANISMI MECCANICI:

- (1) ancoraggio
- (2) effetto arco
- (3) effetto contrafforte
- (4) rinforzo radicale

- Nella teoria del pendio indefinito...

RINFORZO RADICALE BASALE



- Nella formula...

$$FS = \frac{c' + [(1 - m)\gamma + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)] H \cos^2 \beta \tan \phi'}{[(1 - m)\gamma + m\gamma_{sat}] H \sin \beta \cos \beta}$$

$$FS = \frac{(c' + c_b) + [(1 - m)\gamma + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)] H \cos^2 \beta \tan \phi'}{[(1 - m)\gamma + m\gamma_{sat}] H \sin \beta \cos \beta}$$

Fonte: Massimiliano Schwarz

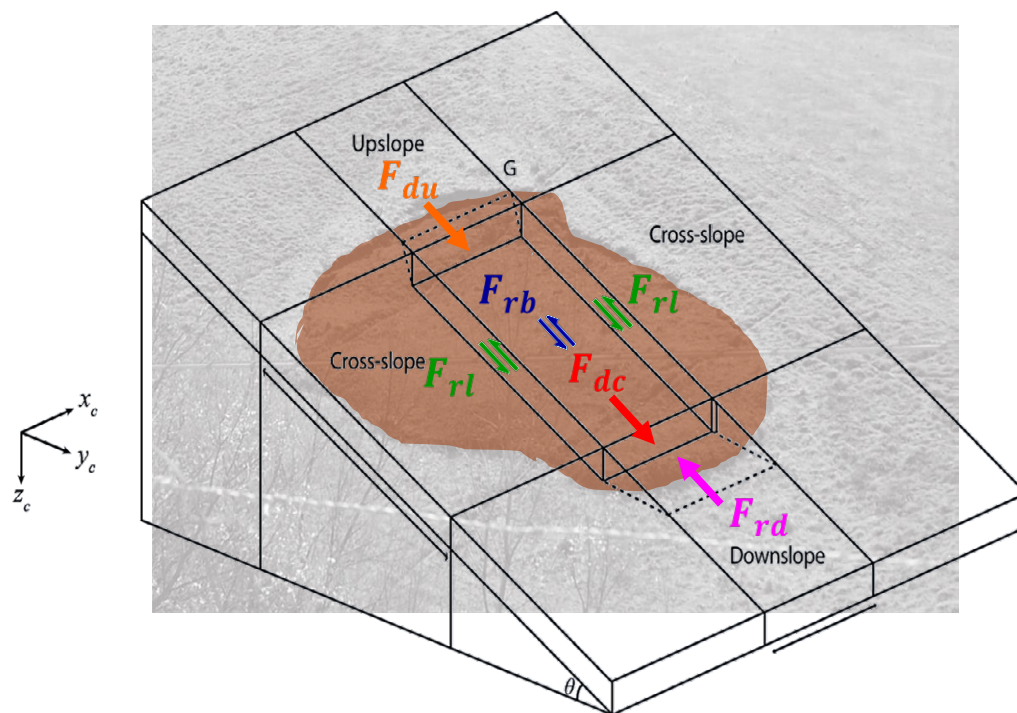
Images courtesy of Stefano Mirri (<http://www.geologitoscana.net>)
05/2006-Castelvecchio di San Gimignano (SI)

- ...ciò che non rientra nella teoria del pendio indefinito

RINFORZO RADICALE LATERALE



Modelli tridimensionali



$$FS = \frac{F_{rb} + 2 F_{rl} + F_{rd} - F_{du}}{F_{dc}}$$

PARAMETRI:

- dimensione del blocco:
larghezza (w) and lunghezza (l);
- pendenza del blocco (θ);
- parametri geotecnici:
peso per unità di suolo (γ_s);
angolo di attrito interno (ϕ');
coesione efficace (c');
- profondità (z);
- rinforzo radicale (C'_r);
- altezza della falda (m).

$$F_{rb} = (C'_{rb} + (\gamma_s - \gamma_w m) z \cos^2 \theta \tan \phi') w l$$

$$F_{rl} = 0.5 K_0 (\gamma_s - \gamma_w m^2) l z^2 \cos \theta \tan \phi' + C'_{rl} l z \cos \theta$$

$$F_{rd} = 0.5 K_p z^2 (\gamma_s - \gamma_w m^2) w$$

$$F_{du} = 0.5 K_a z^2 (\gamma_s - \gamma_w m^2) w$$

$$F_{dc} = \gamma_s z w l \sin \theta \cos \theta$$

Cislaghi et al. 2017. Including root reinforcement variability in a probabilistic 3D stability model. Earth Surface Processes and Landforms 42, 1789–1806. <https://doi.org/10.1002/esp.4127>

Letteratura

- Bowles, J.E., 1997. Foundation analysis and design, 5th edition. ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore.
- Das, B.M., 2010. Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning, Stamford, Connecticut, USA.
- Das, B.M., Sobhan, K., 2012. Principles of geotechnical engineering, Eighth edition. ed. Cengage Learning, Stamford, Connecticut, USA.
- Taylor, D.W., 1948. Fundamentals of Soil Mechanics, Second printing. ed. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts U.S.A.
- Craig, R.F., 2004. Craig's soil mechanics, 7th ed. ed. Spon Press - Taylor and Francis Group, London U.K. and New York U.S.A.
- Soubra, A.-H., Macuh, B., 2002. Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach. Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering 155, 119–131.
- Caquot, A.I., Kérisel, J.L., 1948. Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations. Gauthier-Villars, Paris, France.