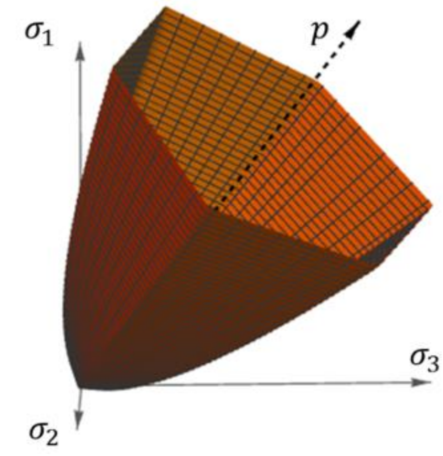
Factor de seguridad mediante reducción de parámetros resistentes en el modelo de Hoek-Brown

Osvaldo N. Ledesma, I. García Mendive y A. O. Sfriso

SRK Consulting (Argentina) y Universidad de Buenos Aires

Introducción



El criterio de Hoek-Brown es el standard de la industria para calcular factores de seguridad de taludes y túneles en macizos rocosos

Numerosas implementaciones de H-B como modelo elastoplástico arrojan resultados no comparables

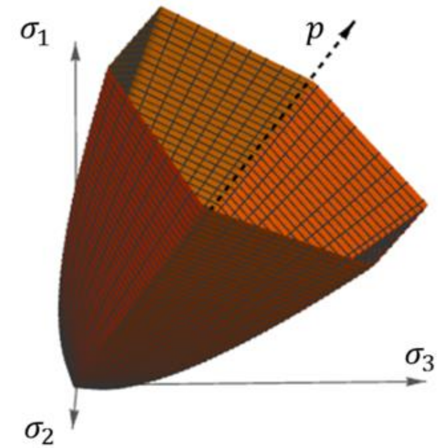
En este trabajo

- Implementación exacta de H-B como M-C con $\phi[\sigma_3]$
- Formulación consistente con técnica de reducción de parámetros resistentes (para cálculo de FoS)
- Efecto de la no asociatividad
- Benchmarking

Criterio de falla de Hoek-Brown como Mohr-Coulomb con $\phi[\sigma_3]$

Hoek-Brown (2002)

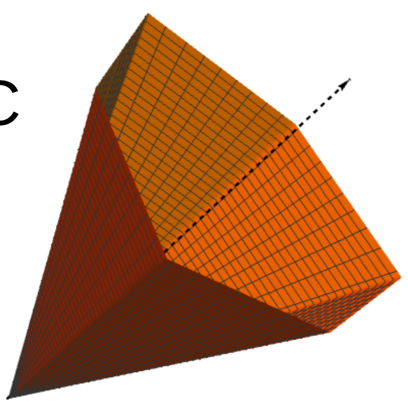
$$f_{HB} = \sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_c \left(s - m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^a = 0$$



Mohr-Coulomb (1776)

$$f_{MC} = \sigma_3 - \sigma_1 + (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot sin[\phi] - 2c\, cos[\phi] = 0$$

- Todas las soluciones analíticas emplean M-C
- No tiene “ediciones”
- H-B no es sólo M-C con un generatriz curva
- En esta versión $\mathrm{cp} = const$ y $\phi[\sigma_3]$

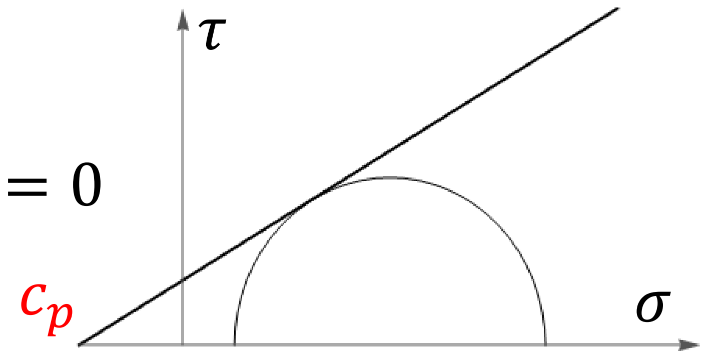


Criterio de falla de Hoek-Brown como Mohr-Coulomb con $\phi[\sigma_3]$

M-C y H-B comparten el vértice

$$f_{MC} = \sigma_3 - \sigma_1 + \left(\sigma_1 + \sigma_3 - 2c_p\right) sin[\phi] = 0$$

$$c_p = \frac{c}{\tan[\phi]}$$

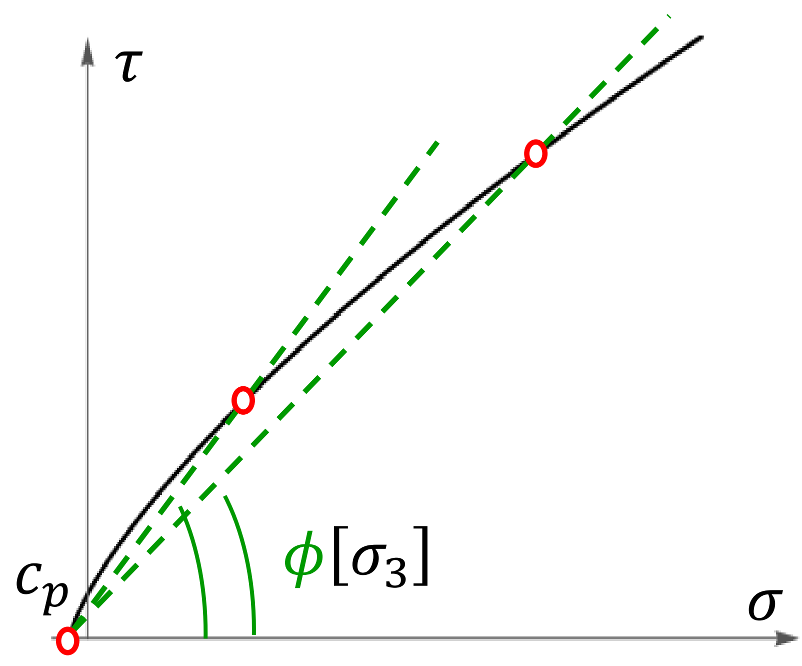


H-B se reescribe como

$$f_{HB} = \sigma_3 - \sigma_1 + \left(\sigma_1 + \sigma_3 - 2c_p\right) sin(\phi[\sigma_3]) = 0$$

$$c_p = \sigma_c \frac{s}{m}$$

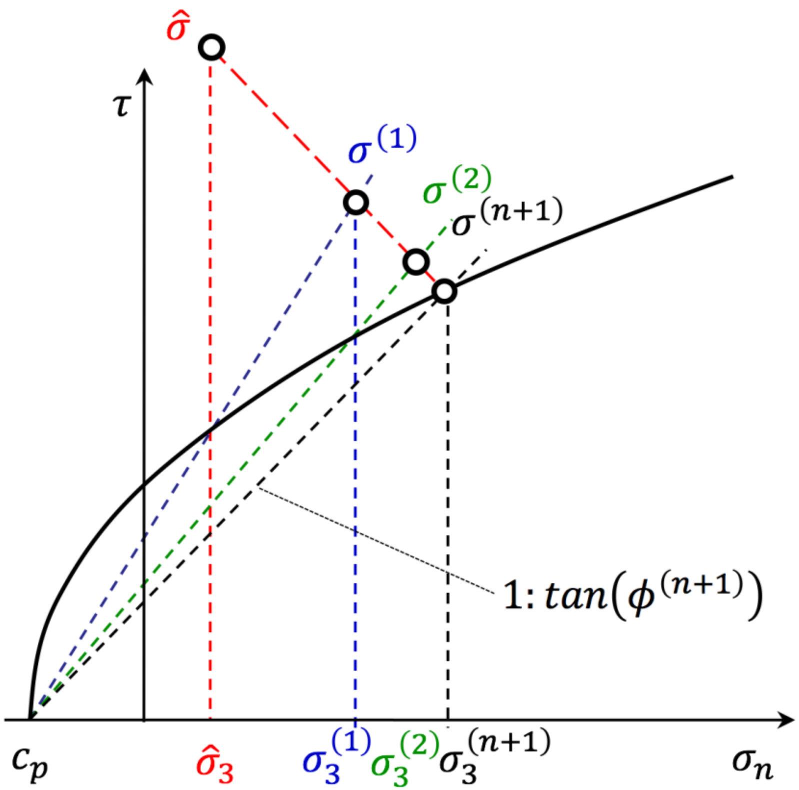
$$sin(\phi[\sigma_3]) = \frac{2}{m}\left(s - \frac{m\,\sigma_3}{\sigma_c}\right)^{1-a}$$



Implementación numérica

Mohr-Coulomb tiene solución analítica

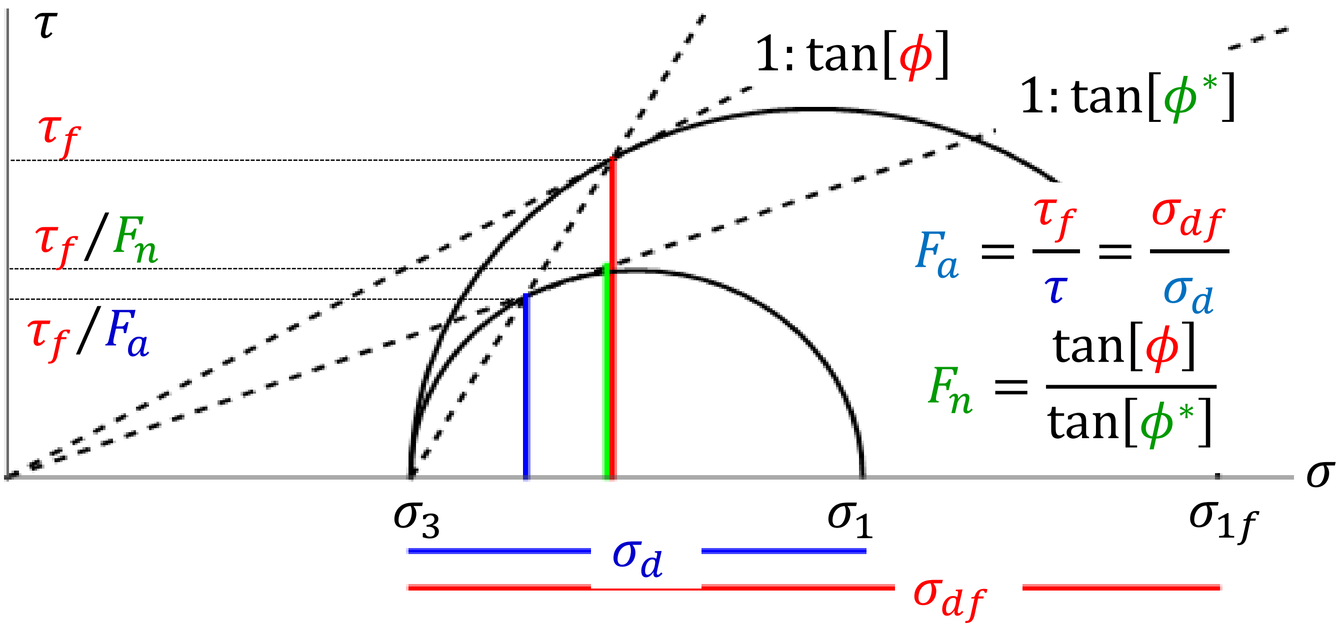
Hoek-Brown: se actualiza $\phi[\sigma_3]$ hasta convergencia



FoS clásico y técnica de reducción de parámetros resistentes

$\boldsymbol{F_a}$: cociente entre la resistencia al corte en el plano de potencial deslizamiento y la tensión en ese mismo plano

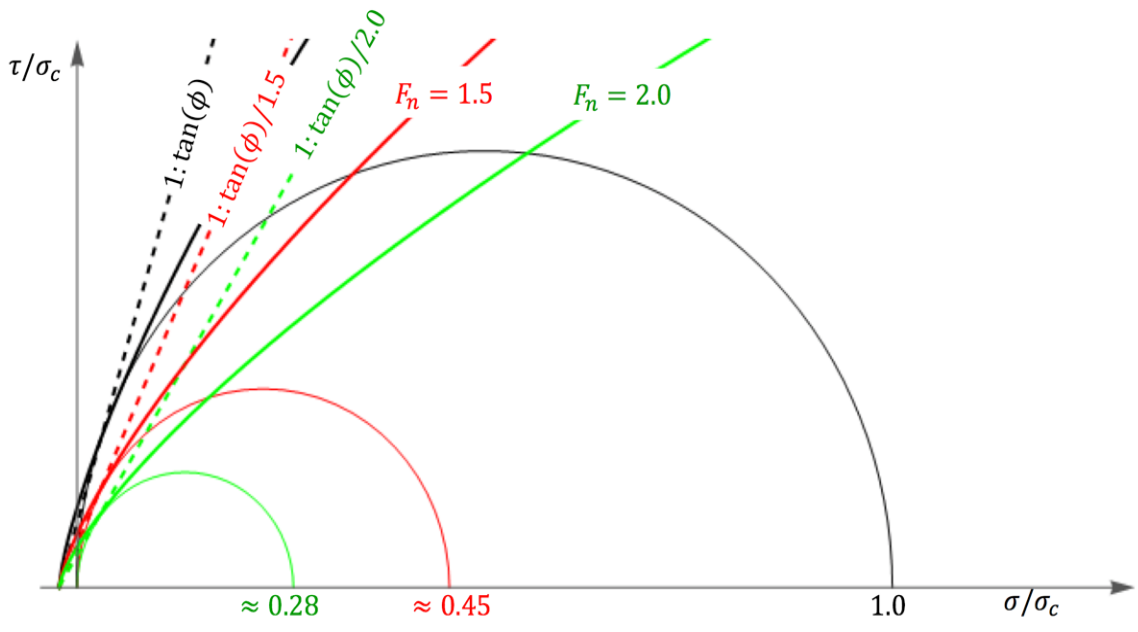
$\boldsymbol{F_n}$: cociente entre la tangente del ángulo de fricción interna y la tangente del ángulo de fricción mínimo que soporta la tensión



Reducción de parámetros resistentes en Mohr-Coulomb con $\phi[\sigma_3]$

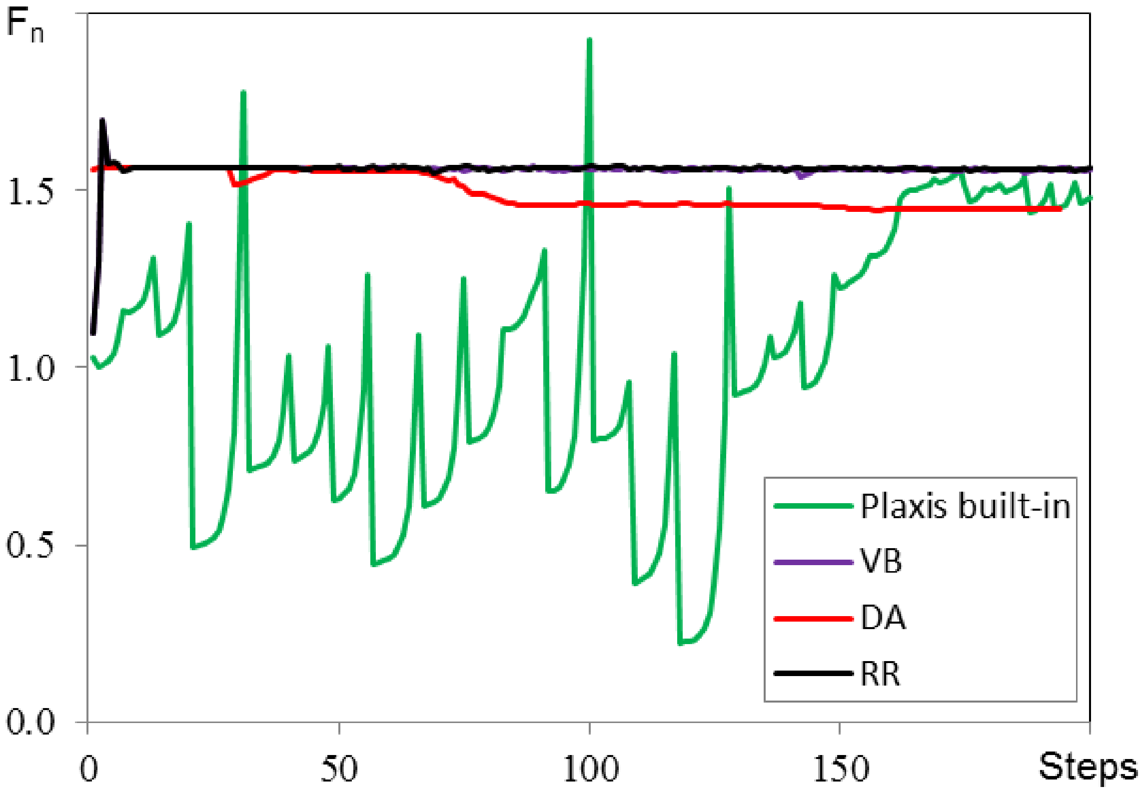
Se resuelve el problema de valores de contorno con
$f^* = \sigma_3 - \sigma_1 + \left(\sigma_1 + \sigma_3 - 2c_p\right) sin[\phi^*] = 0$

- Cambia la apertura del cono, pero el vértice no se mueve
- Se respeta la definición clásica: $\tan[\phi^*] = \tan[\phi]/F_n$

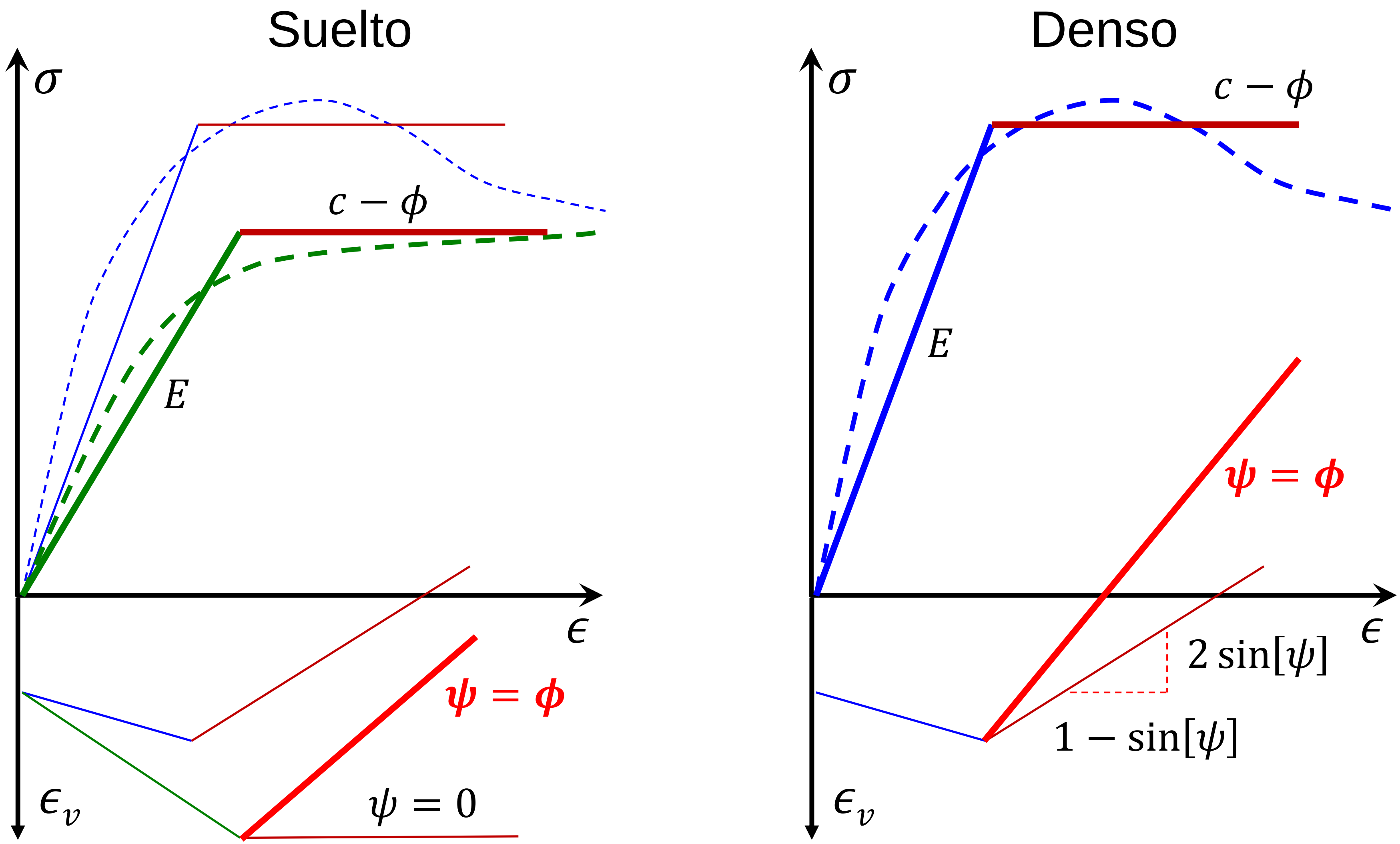


Reducción de parámetros resistentes en Mohr-Coulomb con $\phi[\sigma_3]$

El funcionamiento numérico es claramente superior a la implementación built-in en Plaxis



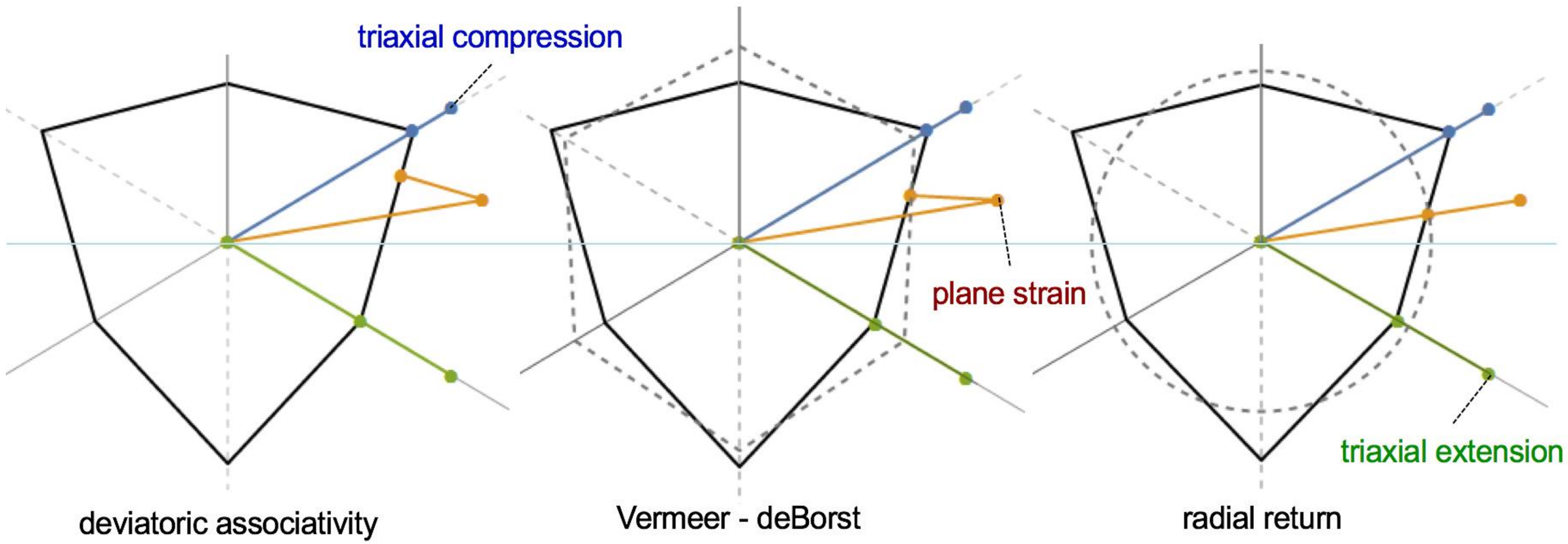
Plasticidad asociativa ($\psi = \phi$) aumento de volumen no realista



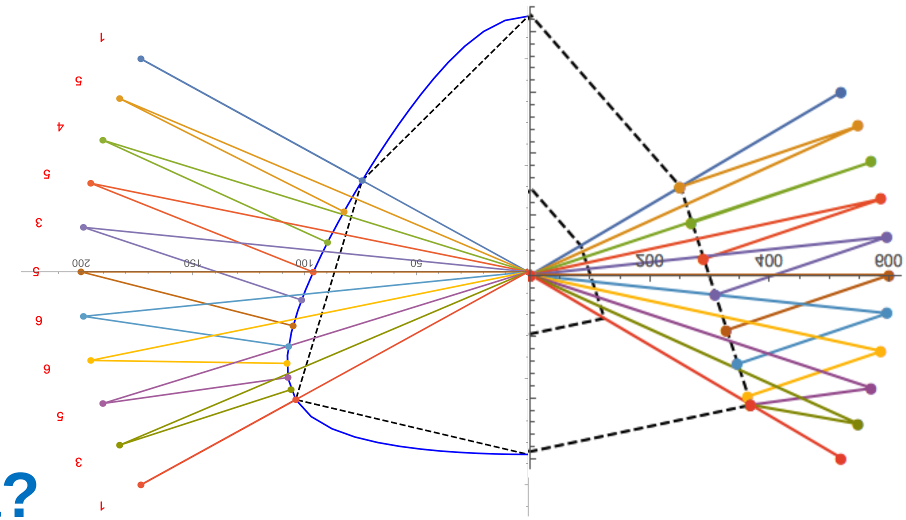
Reglas de flujo no asociativas

Se implementaron tres reglas de flujo en el plano deviatorico

- DA: Asociatividad deviatorica, no asiciatividad volumétrica
- VB: Vermeer-deBorst (no asociativo completo)
- RR: Retorno radial

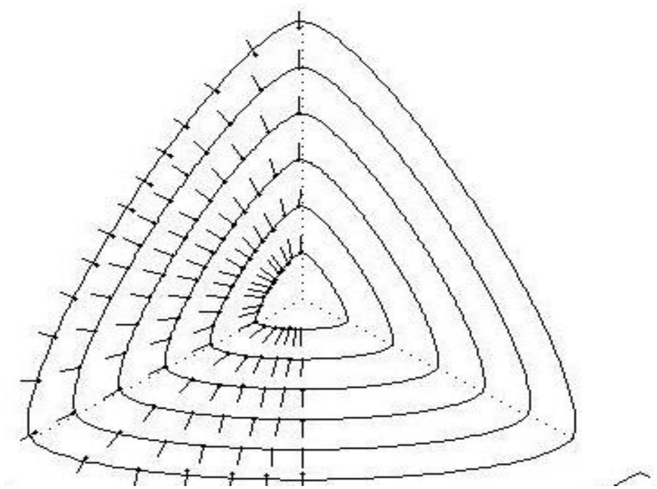


Reglas de flujo no asociativas

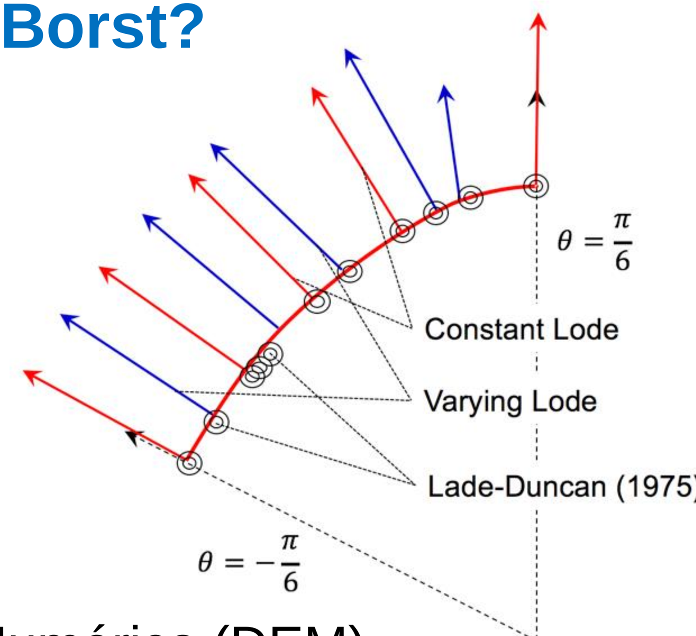


Los geomateriales no cumplen Mohr-Coulomb

- Función de fluencia curva: **¿asociatividad deviatórica?**
- Para Mohr-Coulomb: **¿Vermeer-deBorst?**



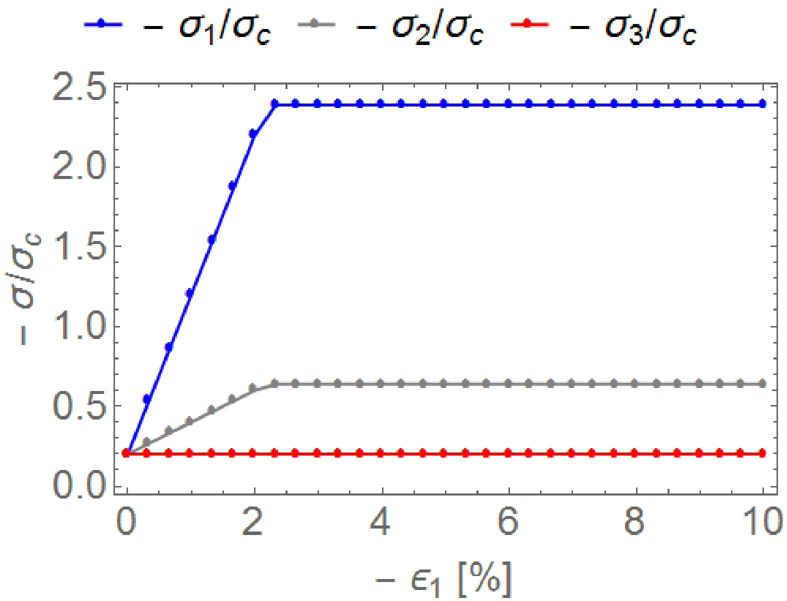
Experimental (Lade 1973)

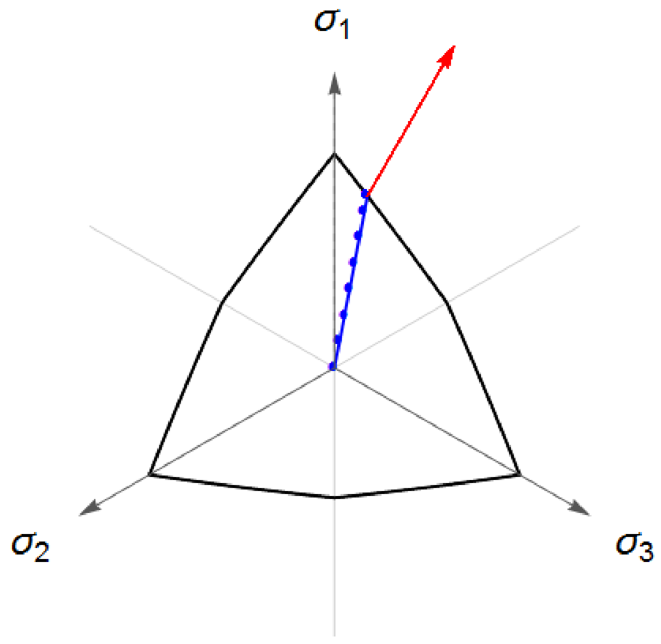


Numérico (DEM) (Phusing 2016)

Ensayo de compresión plana Vermeer-deBorst

σ_2 depende solo de los parámetros elásticos del modelo

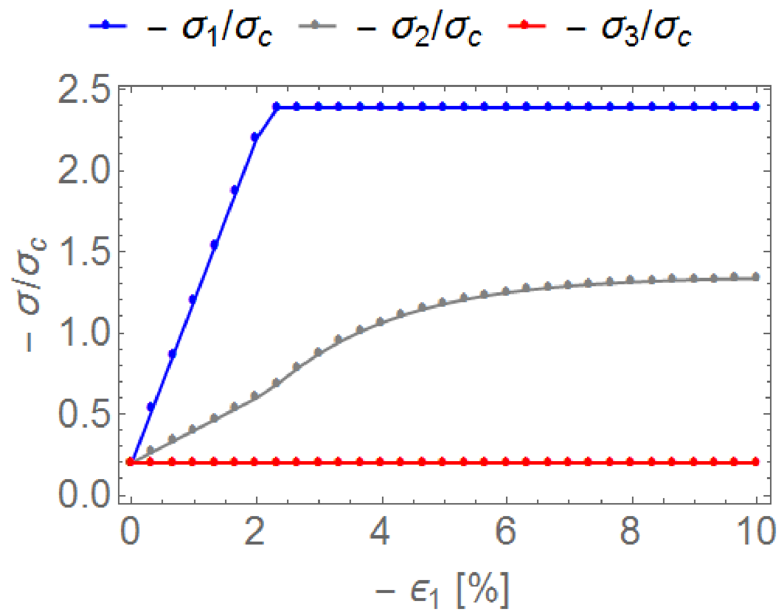


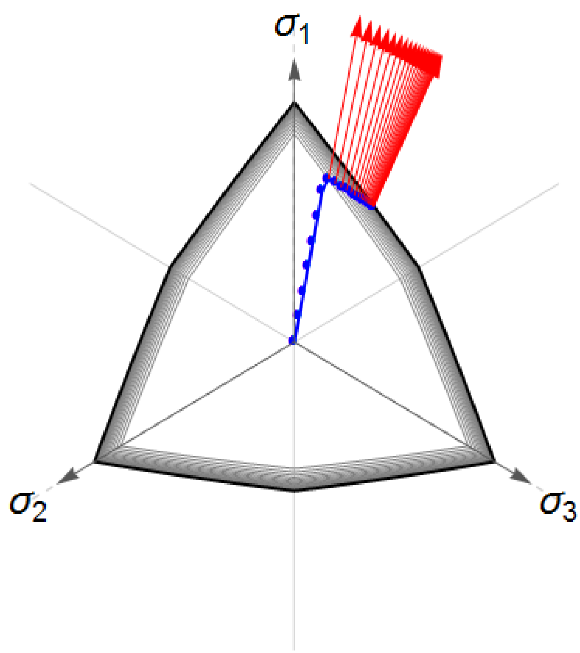


Ensayo de compresión plana
Retorno radial

σ_2 evoluciona durante la plastificación por corte

σ_2 alcanza un valor estacionario que depende de parámetros elásticos y plásticos del modelo

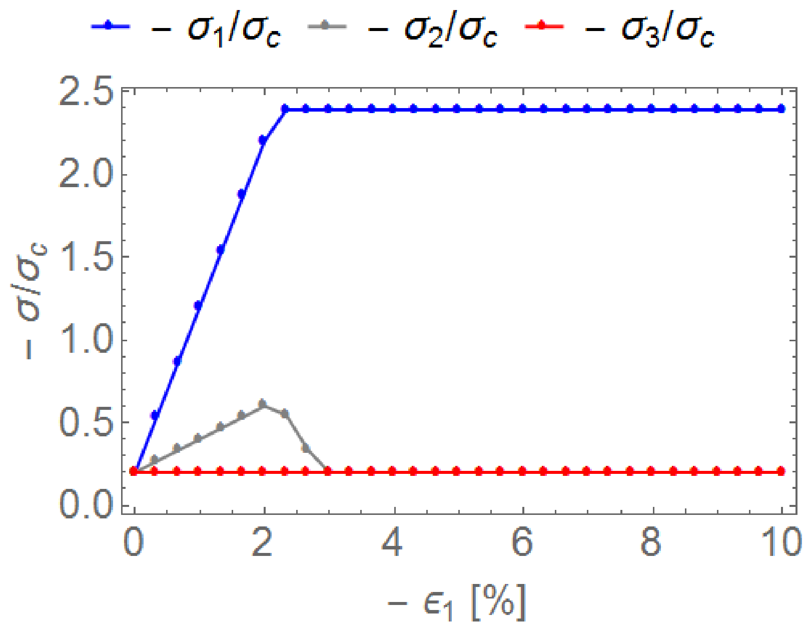


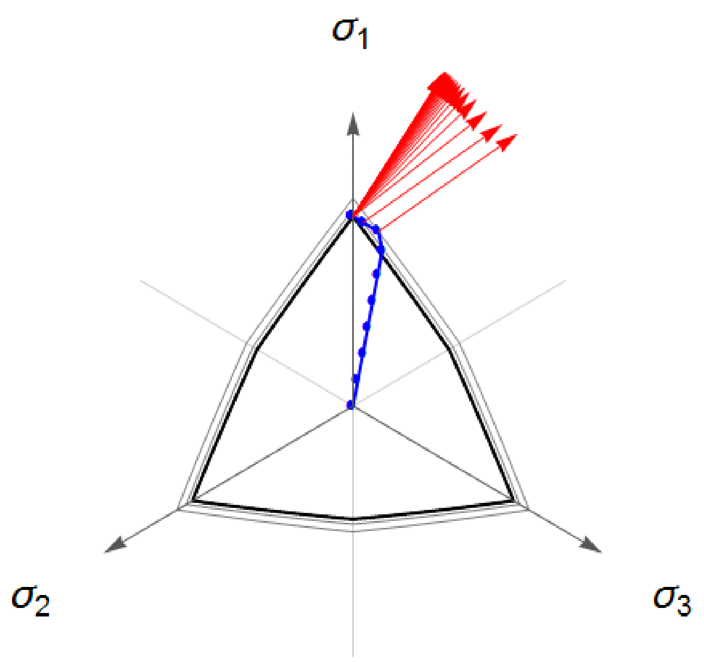


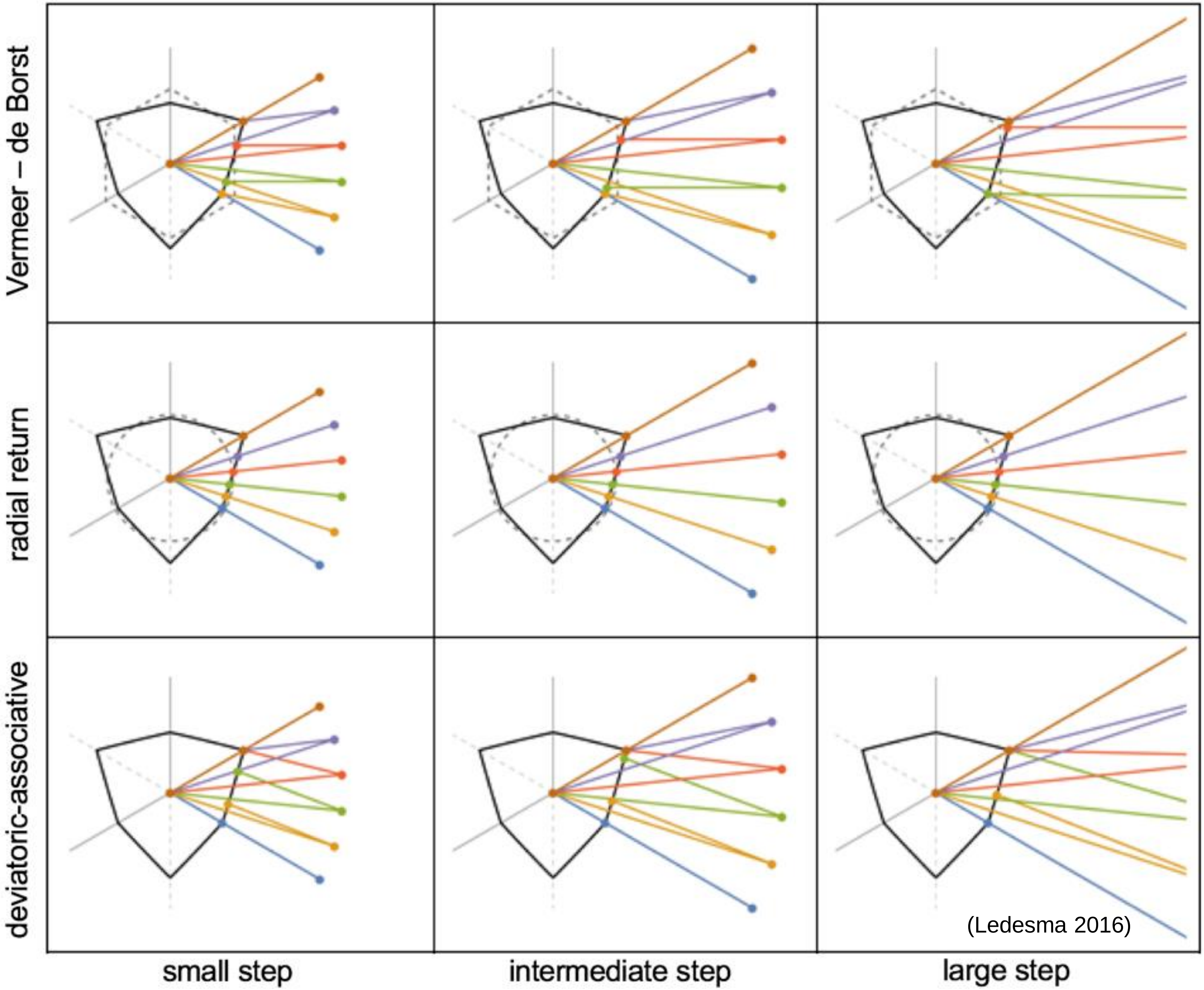
Ensayo de compresión plana
Asociatividad deviatórica

σ_2 evoluciona durante la plastificación por corte

σ_2 termina en el vértice de compresión triaxial





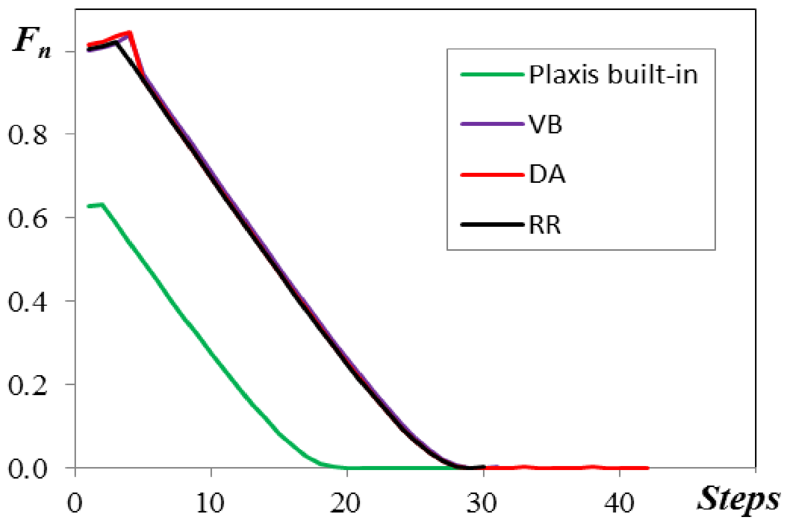


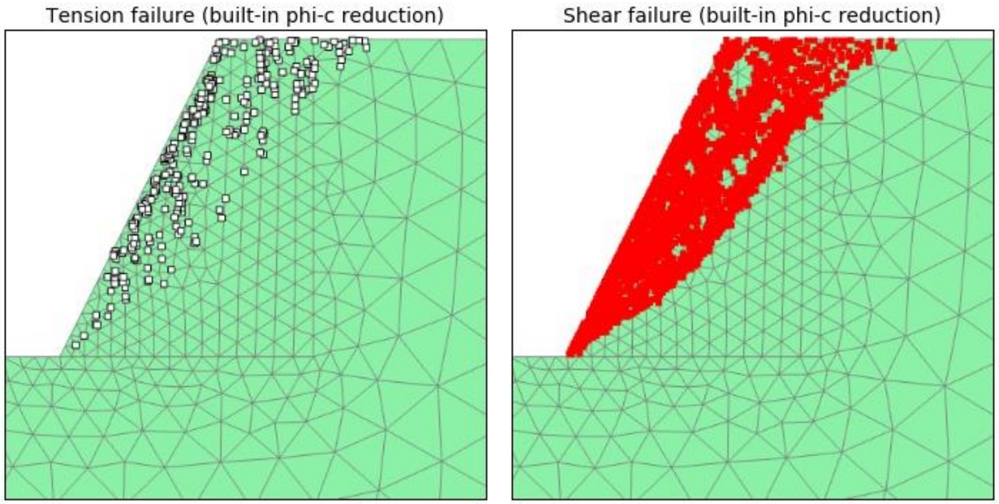
(Ledesma 2016)

Estabilidad de talud:
FoS built-in

Talud de material uniforme en Plaxis para las tres reglas de flujo

Rutina FoS built-in: $\boldsymbol{F_n \to 0}$ (puntos atrapados en el vértice)





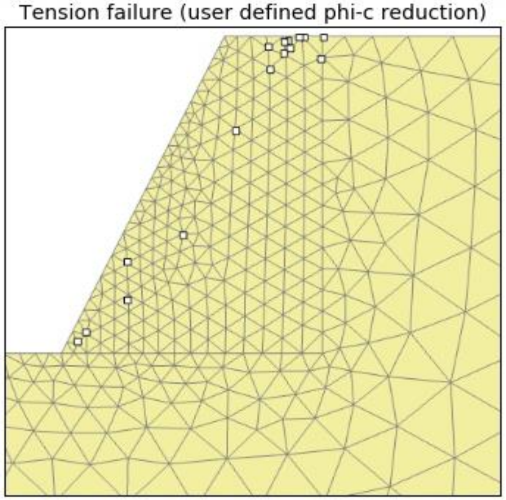
Estabilidad de talud: FoS monotónico

Talud de material uniforme en Plaxis para las tres reglas de flujo

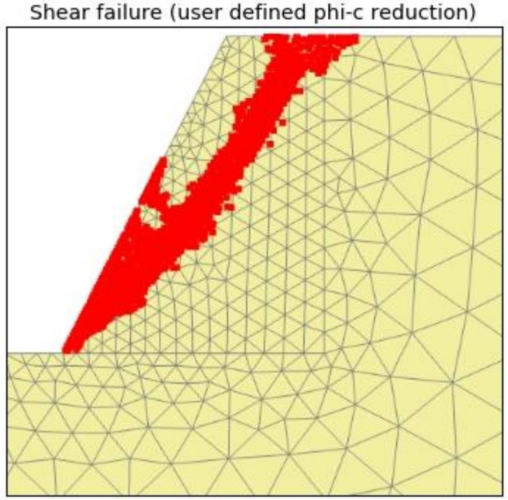
Rutina FoS built-in: $F_n \rightarrow 0$ (puntos atrapados en el vértice)

Rutina Python con FoS monotónico: resultados consistentes

Tension failure (user defined phi-c reduction)

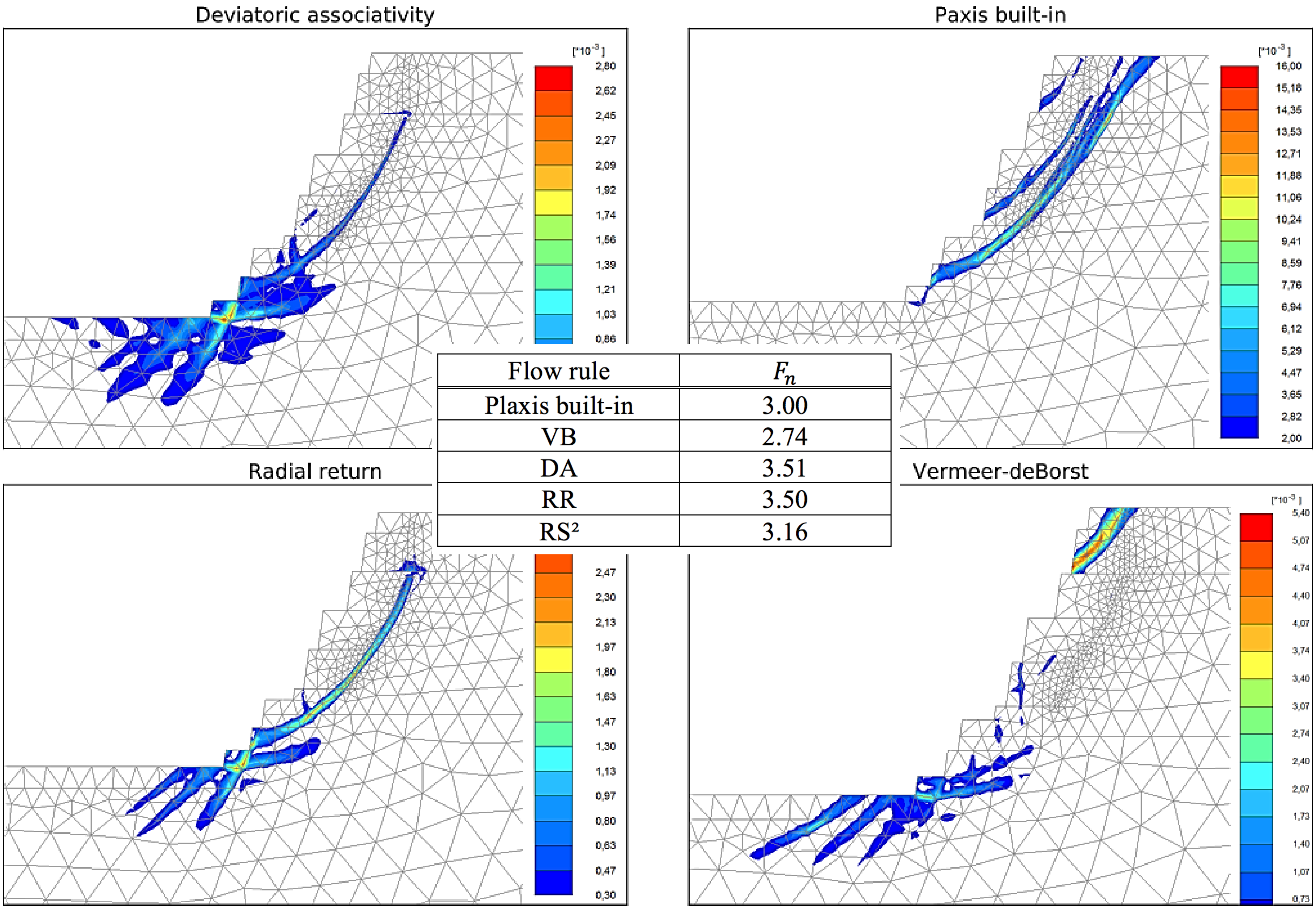


Shear failure (user defined phi-c reduction)



Flow rule	phi-c reduction	
	Built-in	User defined
Plaxis	unstable	-
VB	unstable	1.15
DA	unstable	1.11
RR	unstable	1.11

Talud en Cerro Vanguardia



Flow rule	F_n
Plaxis built-in	3.00
VB	2.74
DA	3.51
RR	3.50
RS²	3.16

Conclusiones

Se reescribió Hoek-Brown como Mohr-Coulomb con $\phi[\sigma_3]$

- Se obtuvo un procedimiento de cálculo de FoS compatible con los métodos analíticos
- La implementación es más robusta que la built-in en Plaxis

Se implementaron tres reglas de flujo

- Se analizó su impacto sobre FoS para un problema de estabilidad de taludes