BASF
The Chemical Company

Iniezioni di consolidamento ed impermeabilizzazione con miscele cementizie microfini e miscele minerali



“Si definisce iniezione l’introduzione a pressione di un materiale in un terreno o in una struttura lapidea al fine di consolidare ed impermeabilizzare vuoti, fessure e porosità”

BASF
The Chemical Company

Iniezioni di consolidamento ed impermeabilizzazione con miscele cementizie microfini e miscele minerali

I cementi microfini

Considerazioni generali

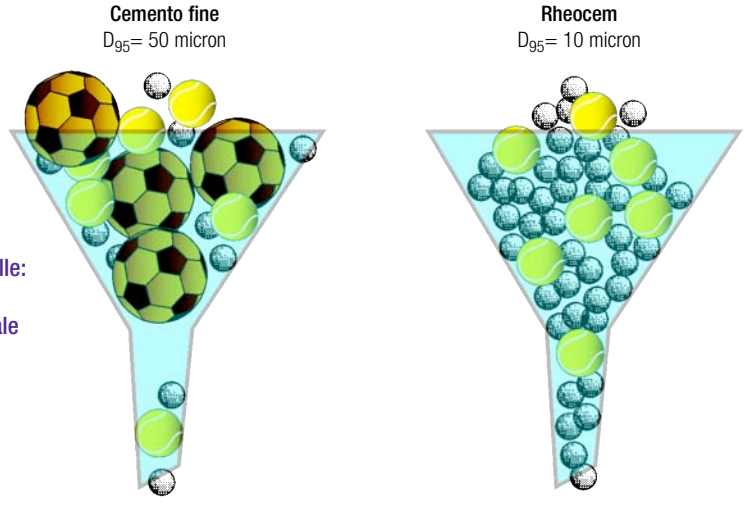
L'utilizzo dei cementi microfini trova largo impiego nelle seguenti tipologie esecutive:

- **negli interventi di impermeabilizzazione e presostegno allo scavo**, dove l'estrema finezza delle fessurazioni in roccia o la ridotta porosità dei terreni impediscono l'assorbimento e la penetrazione delle miscele cementizie tradizionali entro il supporto
- **nella sigillatura di acque di falda**
- **nel consolidamento dei terreni in genere**
- **nelle iniezioni in calcestruzzi fessurati.**

I cementi microfini Rheocem® sono caratterizzati da:

- **elevata finezza**
  questo parametro è determinato dal valore di blaine espresso in m^2/kg e in particolare dal valore $\mathbf{D_{95}}$ che rappresenta la dimensione, espressa in micron (µm), al di sotto dalla quale sta il 95% della massa del cemento microfine: maggiori sono i valori di blaine e di D_{95}, maggiore è la finezza.
- sono composti di **clinker puro di cemento Portland** assortito in opportuna curva granulometrica.

Non è solo importante il diametro minimo delle particelle: occorre che la loro percentuale sia molto elevata rispetto al totale della miscela



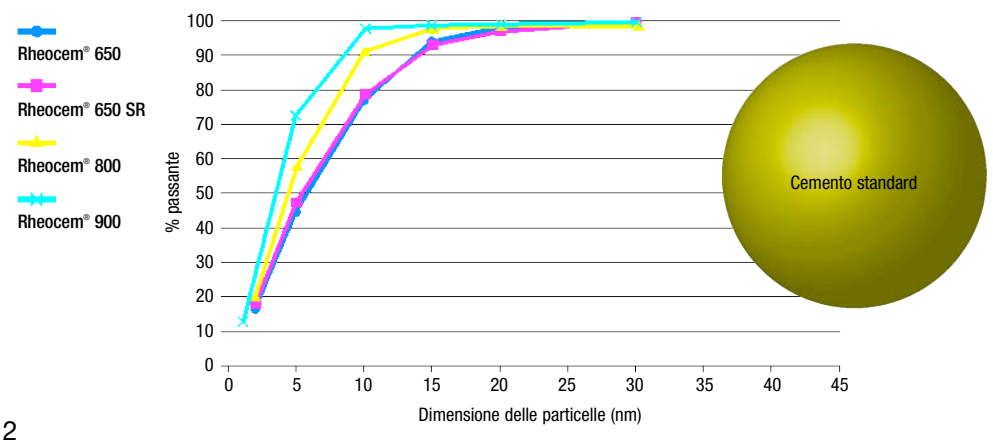
Benefici applicativi

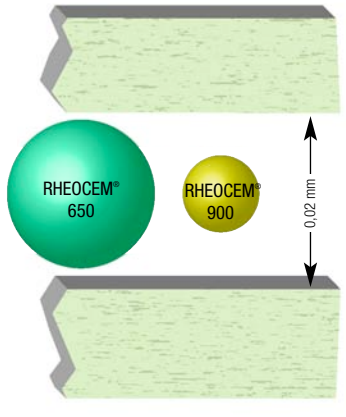
- Grazie al fatto di essere composti di puro clinker Portland presentano **più rapidi tempi di presa** rispetto ai cementi microfini reperibili in commercio formulati con clinker e aggiunte di pozzolana o loppe finimente macinate, filler micronizzati, ecc.: conseguentemente una maggiore rapidità dei tempi di presa comporta una **riduzione dei tempi esecutivi nel loro complesso, un maggiore controllo della possibile dispersione nel terreno e alte resistenze meccaniche.**
  Peraltro c'è da segnalare che, **in caso si debbano necessariamente avere lunghi tempi operativi di lavorabilità (qualche ora)**, è possibile adottare due tecnologie alternative:
  1) l'impiego dei **Rheocem**® con la sigla aggiuntiva **SR** (sulphate resistant),
  2) alla miscelazione dei Rheocem® (650/800/900) si può prevedere l'impiego dell'additivo a base di acido carbossilico **Delvocrete**® **Stabilizer** in ragione di 0.5-1,0 lt/100 kg di cemento avente la funzione di inibire l'idratazione per il tempo ritenuto necessario (da prevedersi in ogni caso l'impiego del **Rheobuild**® **2000 PF**, vedi oltre).
     Prove preliminari sul mantenimento della lavorabilità e sui tempi di presa consentiranno di definire le opportune percentuali dei componenti.
- **eccellente stabilità** anche sotto elevate pressioni di pompaggio, assicurando un'efficace penetrazione in rocce e terreni
- **sensibile riduzione del bleeding** (sedimentazione della parte solida che provoca acqua di essudazione superficiale)
- **impiego di attrezzature** comunemente usate per le comuni iniezioni cementizie
- **economicità** rispetto alle iniezioni chimiche a base di acrilati.

Benefici prestazionali

- **elevata capacità di penetrazione** anche in rocce microfessurate e terreni fini
- **elevate resistenze**
- **elevata durabilità**

Curve granulometriche dei cementi microfini Rheocem®

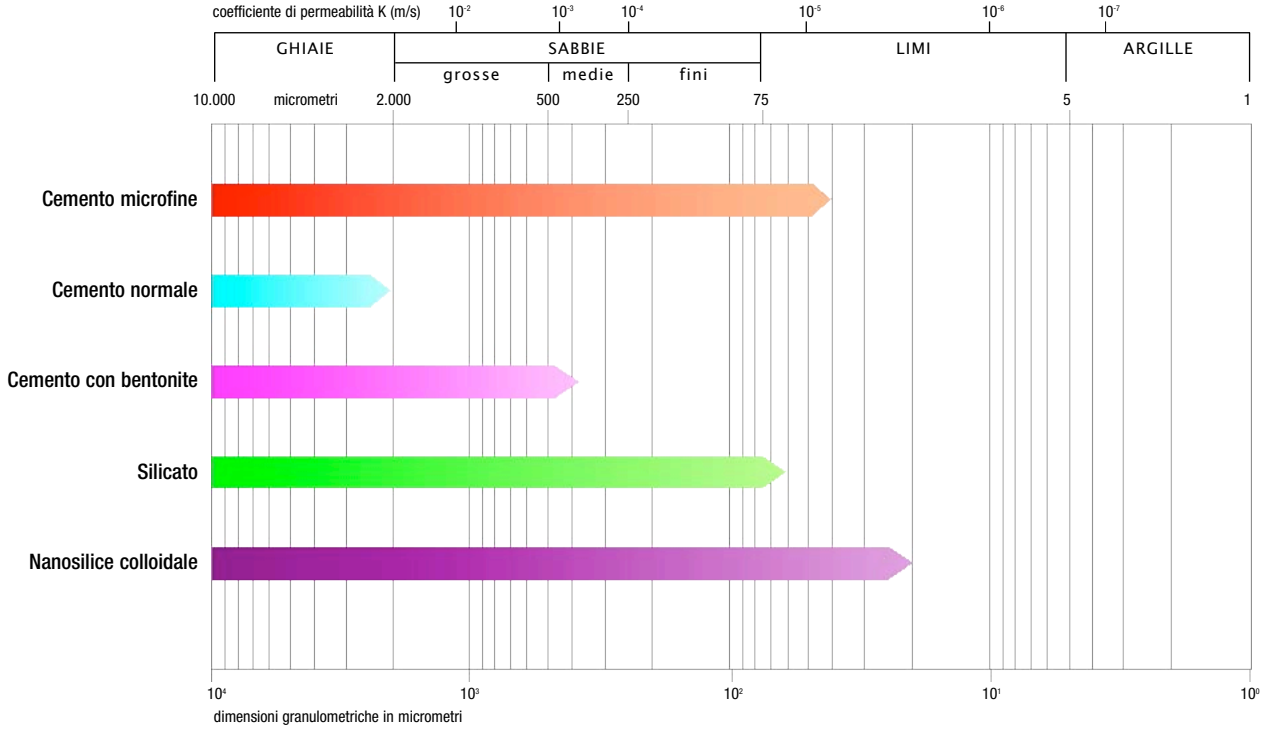




Impiego congiunto del superfluidificante Rheobuild®2000 PF

Come noto, le particelle disperse in acqua tendono a sedimentare sotto l'effetto della gravità, il che incide negativamente sulla capacità della miscela a penetrare e consolidare il sistema fessurato e/o poroso: il volume dei vuoti realmente consolidati sarà quello corrispondente alla frazione sedimentata e non quello corrispondente al volume iniettato.
Tale effetto è tanto più significativo quanto più elevato è il rapporto acqua/cemento.
Per ovviare a tale inconveniente e al contempo eliminare la tendenza a flocculare (formazione di grumi), si deve sempre aggiungere alla miscelazione il superfluificante **Rheobuild® 2000 PF**.
Il dosaggio del superfluidificante varia dall'1 al 3% in peso sul cemento: il dosaggio ottimale viene definito in funzione delle specifiche esigenze tecnico-operative (temperature esterne, tipo di attrezzatura, tipologia di iniezione da eseguire, ecc.)

Permeabilità di alcune miscele di iniezione in funzione delle caratteristiche del sistema poroso



Considerazioni tecnico-pratiche sull'utilizzo dei cementi microfini

Considerazioni teoriche di carattere geometrico evidenziano la necessità di rispettare la seguente relazione:

$$D_{95},c \leq 0{,}08 \cdot D_5,t$$

dove

D_{95},c dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 95% del legante

D_5,t dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 5% del terreno

Tale relazione lega quindi la dimensione massima del legante a quella della dimensione minima dei granuli di sabbia che sono quelli che condizionano i pori di diametro minore del terreno.

Se per esempio si deve trattare un terreno con ***D_5,t = 190 µm****, risulta:*

$$D_{95},c \leq 0{,}08 \cdot 190 = 15\ \mu m$$

e pertanto dalle schede tecniche si può rilevare che il cemento microfine idoneo è ***Rheocem® 800*** *che presenta* ***D_{95},c < 15 µm****.*

Peraltro la condizione sopra espressa va associata alla viscosità della dispersione: infatti dovendo ottenere una **reale immissione** della miscela nel terreno, è opportuno che vengano impiegate pressioni di iniezioni tali da non danneggiare meccanicamente il sistema da consolidare. Quindi una bassa viscosità della miscela risulta indispensabile allo scopo di facilitare la penetrazione della stessa.
Risulta infine anche indispensabile che non si verifichino rigonfiamenti della miscela o che le particelle costituenti la miscela stessa non diano origine a fenomeni di agglomerazione nel caso vengano a contatto con acqua nella fase dispersa, cioè a iniezione effettuata.

I cementi microfini Rheocem® soddisfano pienamente a tali requisiti grazie alla loro elevata fluidità e stabilità volumetrica nel tempo.

Peraltro relativamente alla capacità di grouting, cioè di reale immissione nel terreno, di una miscela di cementi microfini, alcuni autori legano le caratteristiche del terreno a quelle del microcemento secondo le seguenti relazioni (rapporto di iniettabilità della miscela- groutability ratio - *da Mitchell, 1981)*:

$$N = D_{15} / D_{85,\ microcemento}$$

dove

D_{15} dimensione in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 15% del terreno

$D_{85,\ microcemento}$ dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta l'85% del legante

Se **N** è >24 il grouting è possibile, mentre per **N** <11 non lo è.
Nell'intervallo tra 11 e 24 il grouting è possibile previe prove preliminari.

Alternativamente:

$$N_c = D_{10} / D_{95,\ microcemento}$$

dove

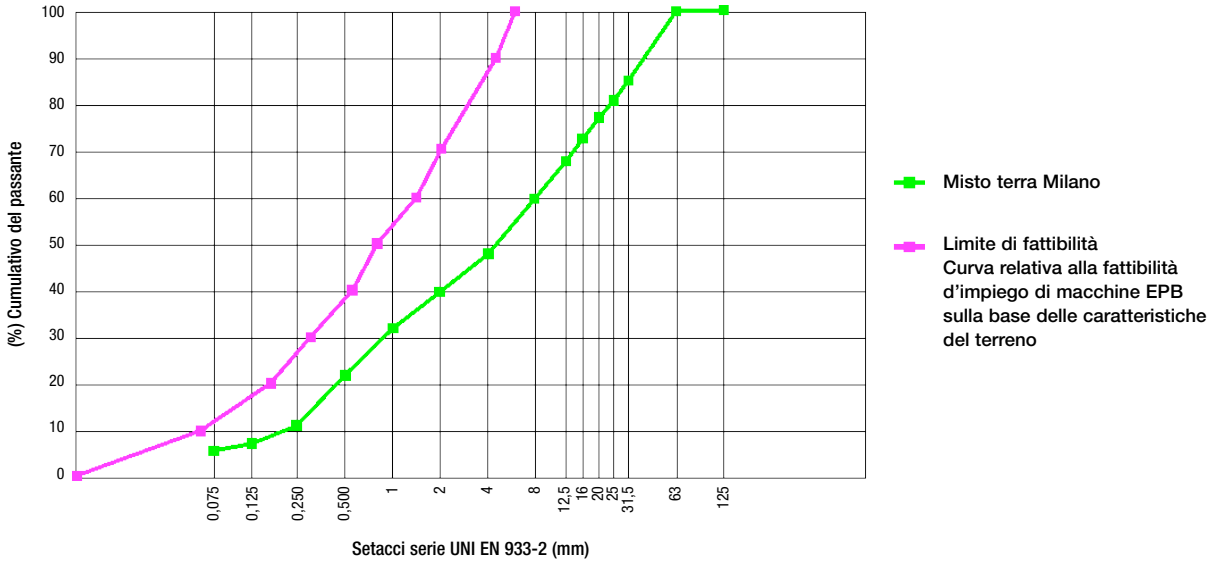
D_{10} dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 10% del terreno

$D_{95,\ microcemento}$ dimensione espressa in micrometri (µm) al di sotto della quale sta il 95% del legante

Se **Nc** è >11 il grouting sarà possibile, mentre per **Nc** <6 non lo è.
Nell'intervallo tra 6 e 11 il grouting è possibile previe prove preliminari.

*Se per esempio D_{15} ~375 µm e D_{10} ~250 µm (terreno tipico di Milano, vedi figura), può essere impiegato **Rheocem® 650** che, avendo D_{85} <15µm e D_{95} <20µm, comporta i valori N = 375/15 = 25 e Nc = 250/20 = 21 (grouting possibile di iniezione), mentre un cemento Portland ordinario (classe 42.5), per il quale si può stimare in media D_{85} ~55 µm e D_{95} ~45 µm , comporta N = 375/55 = 6,8 e Nc = 250/ 45 = 5,5, il che renderebbe impossibile, secondo i criteri di cui sopra, il suo utilizzo nel consolidamento del terreno.*
*Nel caso si adottasse il primo metodo, risultando D_{95},c ≤ 0,08 • 75= 6 µm, si potrà fare impiego di **Rheocem® 900** per il quale fra 5 e 10 µm si ha oltre il 98% di passante (il primo criterio risulta così più restrittivo).*

Analisi granulometrica di terreno nei pressi di Milano



Per quanto riguarda invece le iniezioni cementizie **in rocce fessurate** si può fare riferimento al seguente rapporto di iniettabilità:

$$Nr = \frac{\text{larghezza della fessura}}{D_{95,\ \text{microcemento}}}$$

Se **Nr > 5** il grouting è possibile con miscele cementizie, se **Nr < 2** non lo è.

*Si può così vedere, per esempio, che con **Rheocem® 650** si possono iniettare fessure di 75 µm (D_{95} ~15 µm, da cui larghezza della fessura = 15x5 = 75 µm), mentre con **Rheocem 900** è possibile iniettare fessure di 40 µm (100 µm = 0,1 mm)*

Rapporto di iniettabilità: capacità di una miscela di penetrare in un terreno o in formazione rocciosa

Terreni	N > 24	N < 11
	grouting possibile	grouting non possibile
alternativamente		
	N_c > 11	N_c < 6
	grouting possibile	grouting non possibile

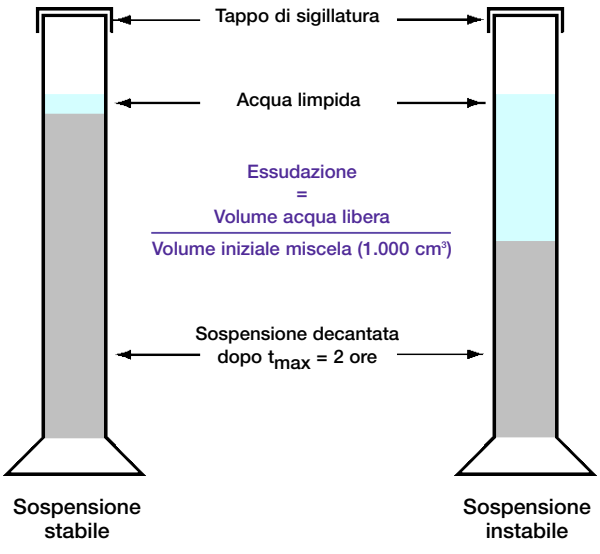
Rocce	Nr > 5	Nr < 2
	grouting possibile	grouting non possibile

Nella seguente tabella sono riportati i rapporti di iniettabilità per **terreni soggetti a liquefazione** che notoriamente comporta una perdita di resistenza fino al conseguimento delle condizioni di fluidità (per esempio sedimenti sabbiosi saturi in acqua che, perdendo contatto reciproco, assumono comportamento da liquido, o sedimenti che si trovano al di sotto del terreno di falda e che si comportano come un liquido viscoso a causa di un aumento della pressione neutra, o interstiziale o dell'acqua, e di una riduzione della pressione efficace). Come noto, la possibilità di liquefazione è uno degli aspetti più importanti nell'ambito dell'**ingegneria sismica**.
Come si può rilevare, in base ai criteri esposti, solo i cementi microfini sono in grado di poter essere iniettati nella maggior parte dei terreni soggetti a possibile liquefazione.

Tipo cemento	N	Nc
Cementi Portland Normali	1 - 9	1 - 5
Cementi microfini	15 - 113	8 - 71

Valutazione del bleeding (acqua essudata)

Schema della prova
per la determinazione
del tasso di sedimentazione





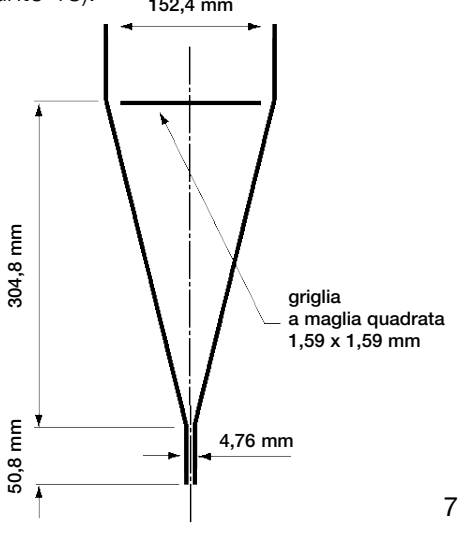
Le soluzioni solide tendono a sedimentare cioè a separarsi nei loro costituenti.
La figura riporta la **prova di bleeding**, che consente di valutare la separazione tra la parte solida (cemento) e la parte liquida (acqua). Riempito con la miscela il tubo (diam. interno 60 mm, altezza 400 mm, capacità di almeno 1 litro) e atteso un tempo di 2 ore, il valore del volume di acqua risalita in superficie viene diviso per quello del volume originario della miscela pari a 1.000 cm^3: il numero ottenuto, espresso in percentuale, costituisce **il valore di bleeding** (secondo UNI 11152, punto 11).
Con i cementi microfini **Rheocem® il valore è <1%** a significare l'elevata capacità di ritenzione d'acqua della miscela che non sarà così soggetta a fenomeni di separazione una volta iniettata.

Valutazione della fluidità (cono di Marsh)

Per la facilità d'impiego anche in cantiere oltre che in laboratorio è possibile fare uso del cono di di Marsh che consente di valutare il tempo di efflusso di 1 litro di miscela (secondo UNI 11152, punto 13).



	Tempo di efflusso
Acqua	~28 secondi
Rheocem® 900 a/c 1.0 Rheobuild® 2000 PF 2%	~33 secondi



Valutazione dei tempi di presa

Caratteristiche medie di impasti di Rheocem® (T = 20°C)
Con un dosaggio medio di Rheobuild 2000 PF di 1,5% risulta:

Densità boiacca		**1,48 – 1,50 kg/lt**
Rapporto acqua/cemento		**1.0**
Tempi di presa	**inizio**	**60-120 minuti**
	finale	**120-150 minuti**

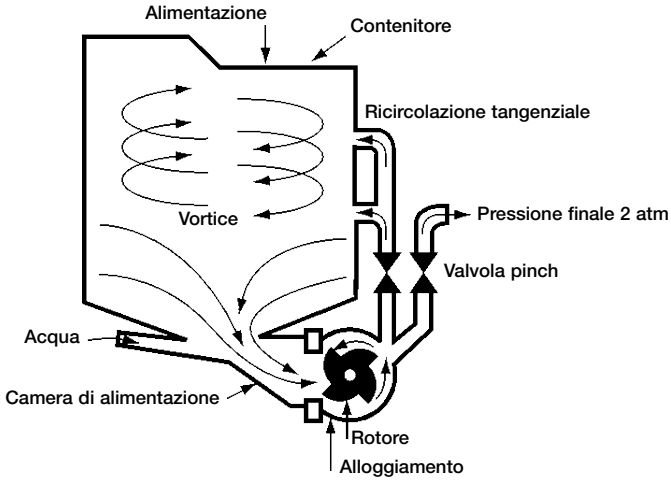
Inizio e fine presa vengono misurati mediante l'**ago di Vicat** (secondo UNI EN 196-3).



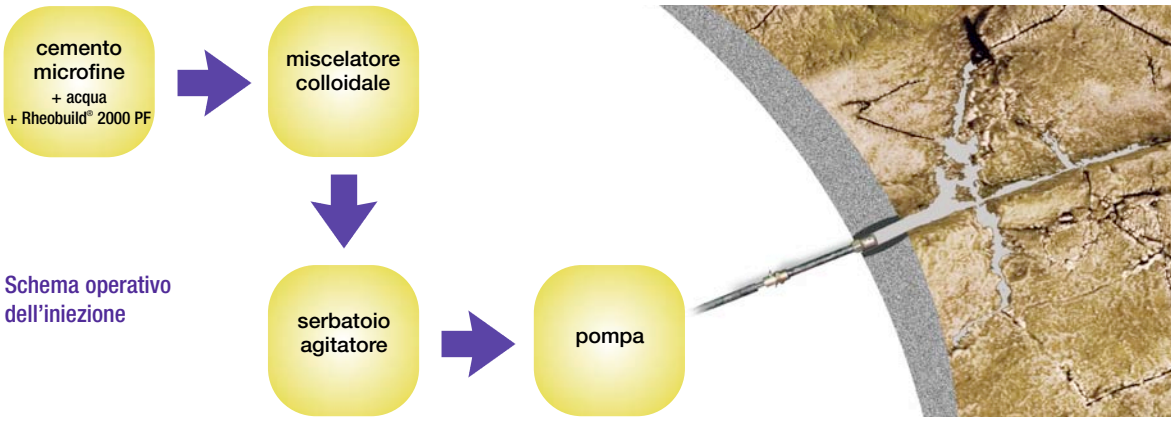
Tipologia di attrezzature

È estremamente importante utilizzare miscelatori efficienti nella preparazione delle miscele. Essi devono consentire una rottura dei grumi che si formano nelle miscele cementizie (flocculazione) e al contempo consentire un'efficace bagnatura di tutte le particelle di cemento in modo da facilitarne la corretta idratazione.
A tale scopo è raccomandabile usare miscelatori ad elevata velocità (1500-2000 rpm) come **i miscelatori colloidali**, che creano un vortice e un moto di taglio che realizza le condizioni ottimali per i cementi microfini, consentendone la diffusa e omogenea idratazione di tutte le particelle.

Miscelatore colloidale







Schema operativo dell'iniezione

Resistenze meccaniche

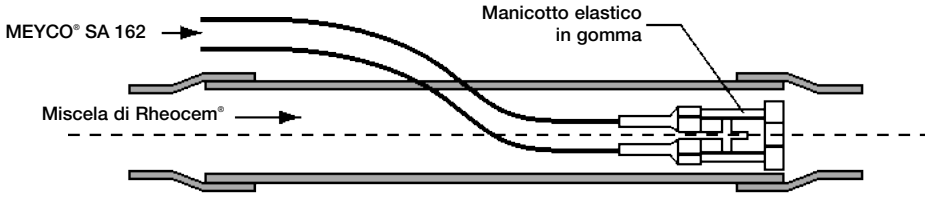
In genere le comuni iniezioni cementizie presentano rapporti acqua/cemento (a/c) compresi tra 1,0 e 2,0, ma occorre tenere presente che a tali valori calano sensibilmente le resistenze ed aumenta fortemente la probabilità della sedimentazione della miscela.



Con i cementi microfini **Rheocem**® si possono ottenere, **con rapporti a/c= 1.0, resistenze meccaniche a compressione di 10-15 MPa a 3 giorni**.
Con altri materiali di iniezione (per esempio silice colloidale, soluzioni a base di silicati, ecc.), che reagiscono attraverso fenomeni di gelificazione, non si ottengono resistenze meccaniche confrontabili con quelle ottenute con i cementi microfini.
Peraltro l'impiego del Rheobuild® 2000 PF può consentire di ottenere rapporti a/c inferiori a 1,0 (il valore sarà definibile in funzione delle condizioni tecnico-operative, delle attrezzature, delle tempistiche, ecc.): in tal caso ovviamente ci sarà un incremento delle resistenze meccaniche.

Accelerazione delle miscele con cementi microfini

Come già espresso, i Rheocem, essendo a base di clinker puro di cemento Portland, riducono sensibilmente i tempi esecutivi. Nel caso fosse operativamente necessario **accelerarne ulteriormente la presa** (ad esempio nelle fasi di post grouting per evitare il riflusso), si può impiegare congiuntamente **l'accelerante alkali free MEYCO® SA 162, il cui dosaggio sarà definibile mediante prove preliminari**.
La sua aggiunta può essere effettuata attraverso un ugello separato, incorporato nella testa del packer di iniezione, come illustrato nella figura.



Voce di capitolato

La specifica potrà essere così articolata (viene preso ad esempio Rheocem® 800):

Nel consolidamento (o nell'iniezione) verrà utilizzato il cemento microfine Rheocem 800 della BASF CC Italia spa o prodotto similare avente le seguenti tassative caratteristiche:

- *è ottenuto dalla macinazione di puro clinker di cemento Portland (≥ 95%)*
- *valore della finezza: > 800 m²/kg*
- *presenta una ben graduata granulometria, la cui curva deve comprendere le seguenti percentuali passanti: < 20 micron 99% < 10 micron 92% < 5 micron 58%*
- *con rapporto acqua /cemento di 1:1 in peso (impiego di superfuidificante) e a 20°C la presa misurata con ago di Vicat risulta: iniziale 60 – 120 minuti finale 120 – 150 minuti*
- *mescolato con acqua e idoneo superfluidificante con dosaggio mediamente dell'1,5 - 2,5% (1,5 - 2,5 lt/100 kg di cemento microfine), presenta:*

  rapporto acqua/cemento: ≤ 1.0
  densità: 1,48 – 1,50 kg/lt
  flow cone (Baroid con diam.4,76 mm): 32 – 34 sec
  essudazione massima: 1%

In particolare il superfluidificante usato sarà Rheobuild 2000 PF della BASF CC Italia spa o prodotto similare avente le seguenti tassative caratteristiche:

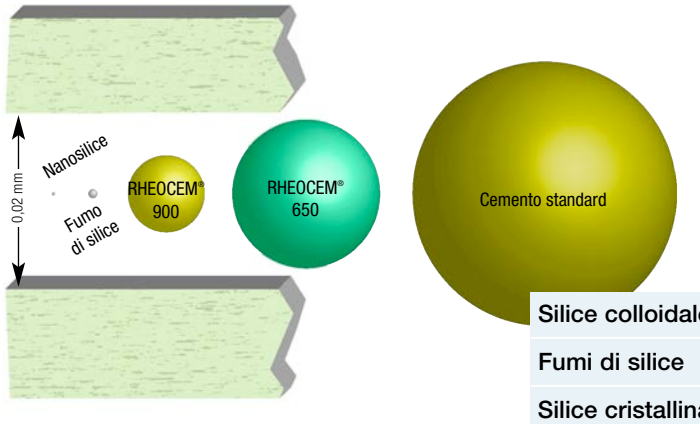
- *a base di polimeri sulfonati in soluzione acquosa (non a base acrilica) e privo di cloruri*
- *densità: 1,23 – 1,25 kg/lt*
- *dosaggio variabile tra 1 e 3 lt/100 kg di microcemento in funzione della riduzione d'acqua richiesta*
- *il produttore sia del microcemento che del superfluidificante deve essere in conformità alla UNI EN ISO 9001:2000*



Le miscele minerali

Considerazioni generali

La silice colloidale, che costituisce l'elemento base delle miscele minerali per iniezioni (**MEYCO® MP 320** e **MEYCO® MP 325**), è una sospensione acquosa in cui sono disperse particelle microscopiche di silice.

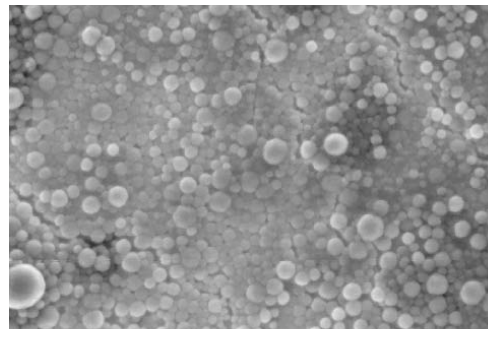


Raffronto dimensionale fra prodotti a base di silice

	Dimensione particelle (micron)	Superficie specifica (m^2/g)
Silice colloidale	**0,016**	**80 - 900**
Fumi di silice	**0,2**	**15 - 25**
Silice cristallina fine	**5**	**10 - 15**

Caratteristiche e benefici applicativi

- **Le particelle di silice colloidale hanno una dimensione variabile da circa 4 a 16 nm** (nm = 10^{-9} m = 10^{-6} mm) e, in virtù delle loro infinitesimali dimensioni, non risentono della gravità e quindi non tendono a sedimentare.
  Ne risulta di conseguenza un **blaine elevatissimo**, dell'ordine di 170 ÷ 750 m^2/g a seconda del tipo.
- Le particelle sono costituite da **SiO_2**, cioè da quarzo, e in particolare da una distribuzione tetraedrica degli atomi che ne conferisce l'amorficità, a differenza di altri composti cristallini a base di SiO_2, i cui atomi sono ordinati a livello molecolare (silice cristallina).
  Inoltre il **ph** risulta compreso tra **9** e **11**, mentre i silicati di sodio presentano valori di ph di 12-13. Tali aspetti comportano che la silice colloidale sia sotto forma polimerica anziché costituita da monomeri, aspetti che ne aumentano la capacità di interazione e di stabilità **(durabilità)**.



- **La silice colloidale presenta una bassissima viscosità** (**5-10 cP**) a seconda del tipo, paragonabile a quella dell'acqua che è pari a 1 cP (per confronto la viscosità dei silicati varia tra 80 e 180 cP); ciò consente alla silice colloidale di penetrare in terreni con basso valore di K ($10^{-4} \div 10^{-5}$ m/s), là dove le usuali tecnologie non consentono risultati soddisfacenti.

Confronto fra le principali caratteristiche della nanosilice e il gel di silicato

	Nanosilice	Silicato "Water-glass"
Dimensione	Nanometrica	Più grossolana
pH	9 - 11	>12
SiO_2 (conc %)	15 - 40	< 35
Viscosità (cP)	< 10	80 - 180
Accelerante	Normale sale da tavola (NaCl)	Acido o sale organico Talvolta ne sono necessari due
Tempo di utilizzo	Può essere controllato	Rapido, di difficile controllo
Meccanismo di gelificazione	Collisione (agglomerazione fisica tra le particelle)	Polimerizzazione (legame chimico fra molecole)
Solubilità	Nessuna	Alta
Sineresi in ambiente umido	No	No
Resistenza	Maggiore, comparata al gel di silicato	

- Con l'aggiunta dell'accelerante è possibile regolare in modo ottimale **il tempo di gelificazione**. Tuttavia sia **MEYCO® MP 320** che **MEYCO® MP 325** possono considerarsi dei **sistemi monocomponenti**, in quanto, pur costituiti da silice colloidale e accelerante, vengono comunemente iniettati con normali pompe monocomponenti.

Diagramma del tempo di gelificazione in funzione della percentuale di accelerante (T= 20°C)

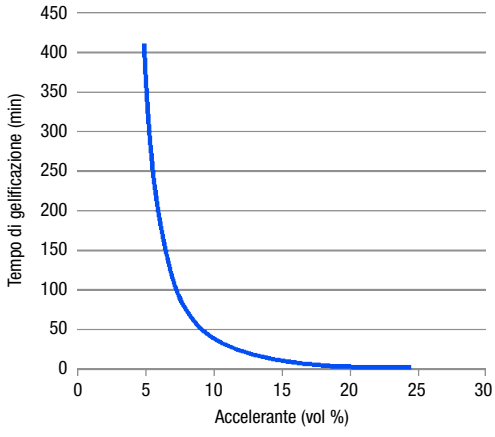
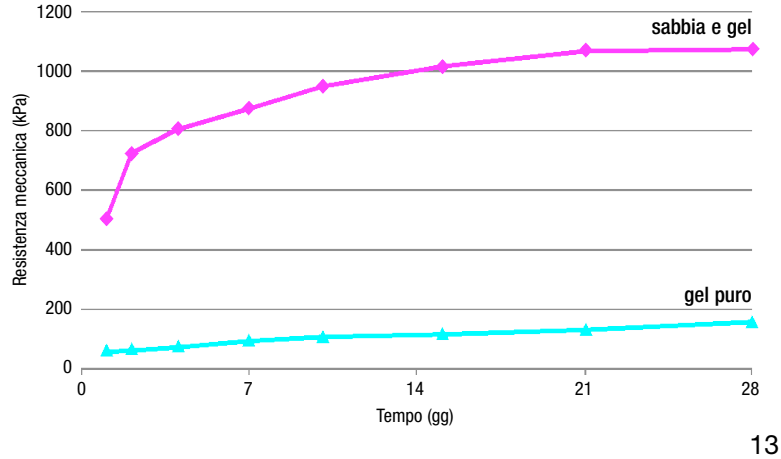


Diagramma delle resistenze meccaniche in funzione del tempo (gg)



- **La silice colloidale non presenta fenomeni di sineresi**, vale a dire di ritiro del gel, dovuto alla separazione tra parte solida e parte liquida, che provoca una espulsione dell'acqua con conseguente decadimento dell'iniezione.

- **La silice colloidale è chimicamente e biologicamente inerte e non tossica**.

Riepilogo

La silice colloidale è una soluzione stabile, contenente singole particelle submicroscopiche di ossido di silicio (SiO_2).

**Per ottenere il gel basta mescolare la silice colloidale con una debole soluzione di acqua e cloruro di sodio (10%) prima del pompaggio.
Più si incrementa la soluzione salina, più rapido è il tempo di gelificazione in modo da poter limitare l'intervento alle zone previste.**

È una sostanza ecocompatibile e durabile nel tempo, essendo composta semplicemente da ossido di silicio, acqua e sale.

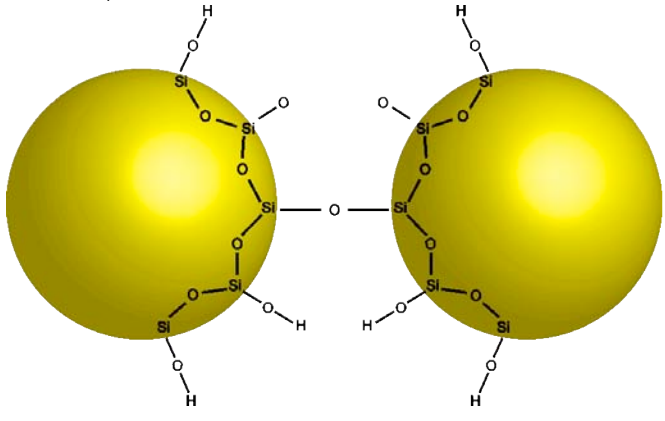
Avendo la consistenza dell'acqua (bassa viscosità), penetra facilmente entro sabbie fini e microfratture, diminuendo drasticamente la permeabilità.

**La resistenza di terreni soggetti a possibile liquefazione
(ad esempio per aspetti progettuali legati al sisma) viene significativamente incrementata dall'iniezione con silice colloidale.**

È estremamente facile da applicare, essendo sufficiente un'attrezzatura standard per iniezione.

Meccanismo d'azione

La superficie della silice è idratata come SiOH e risulta caricata negativamente: conseguentemente le forze repulsive tra le particelle impediscono la collisione l'una con l'altra.
Una volta che le forze di repulsione vengono via via attenuate dall'introduzione dell'accelerante, le particelle cominciano a collidere tra loro: inizia così il processo di gelificazione, per cui si viene a formare un vero e proprio reticolo tridimensionale e l'aggregazione continua fino a che il processo di gelificazione è completato (formazione di legami Si-O-Si).



Campi d'impiego

Date le succitate caratteristiche, le silici colloidali **MEYCO® MP 320** e **MEYCO® MP 325** consentono di realizzare **iniezioni di consolidamento e/o di impermeabilizzazione** di terreni sedimentari stratificati di natura sabbio-limosa ed in particolare:

- **Iniezioni di preconsolidamento per tunneling in genere**
- **Interventi di impermeabilizzazione in caso di trasudamenti e stillicidi in gallerie in corso d'opera o esistenti**
- **Consolidamento di scarpate rocciose degradate**
- **Miglioramento delle caratteristiche geotecniche dei terreni (come componente delle varie tecniche di consolidamento)**







Scelta del tipo di silice colloidale

La differenza tra **MEYCO® MP 325** e **MEYCO® MP 320**, in virtù del diverso processo produttivo, consiste nella maggiore superficie specifica (ca 750 m^2/g del primo contro ca 170 m^2/g del secondo) e nella concentrazione (15% contro 40%).

Tale differenza comporta complessivamente una maggiore reattività iniziale per **MEYCO® MP 325** (prevalenza della finezza), il che può rendere tale formulazione più idonea per rapidi interventi di impermeabilizzazione, mentre la più alta concentrazione di **MEYCO® MP 320** può risultare vantaggiosa a tempi lunghi per un maggiore grado di gelificazione.

Tuttavia, ferme restando le proprietà generali delle iniezioni con le silici colloidali, la scelta ottimale è funzione degli obiettivi che si vogliono raggiungere in base alle caratteristiche del terreno.

La scelta più idonea potrà essere definita opportunamente consultando i nostri tecnici.

Voce di capitolato

La specifica potrà essere così articolata (viene preso ad esempio MEYCO® MP 325):

Nel consolidamento del terreno verrà impiegato il sistema MEYCO MP 325 della BASF CC Italia Spa costituito da silice colloidale in sospensione e relativo accelerante o sistema equivalente avente comunque le seguenti tassative caratteristiche:

- ***la componente A deve essere base di silice colloidale in sospensione avente un blaine di ca 750 m^2/g***
- ***il componente B (accelerante) potrà essere regolato dal 5 al 30% in volume di silice colloidale in modo da poter regolare il tempo di gelificazione***
- ***la miscela dei due componenti avrà una viscosità di ≤10 mPa • sec***
- ***la miscela dei due componenti avrà mediamente una densità di 1,10 kg/lt e un pH <10***
- ***una volta avvenuta la gelificazione, il prodotto finale dovrà risultare innocuo fisiologicamente***
- ***il produttore dovrà essere in conformità alla UNI EN ISO 9001:2000***

Business Line Admixture Systems
Underground Construction

BASF Construction Chemicals Italia Spa
Via Vicinale delle Corti, 21
31100 Treviso, Italia
Tel +39 0422 304251
Fax +39 0422 429485
infomac@basf.com
www.basf-cc.it www.ugc.basf.com