appunti
www.centroappunti.it
Corso Luigi Einaudi, 55/B - Torino

Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO : 204 DATA : 07/02/2012

A P P U N T I

STUDENTE : Sannipoli

MATERIA : Scienza e Tecnologia dei Materiali
Prof. Montanaro

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 324

Argomento
Introduzione ai contenuti del corso e modalità di verifica. Definizione di materiale e evoluzione dei materiali nella storia della tecnologia.

Definizione di materiale ceramico, metallico e polimerico: principali differenze composizionali e di prestazioni. Come le caratteristiche chimico-composizionali influenzano alcune fondamentali proprietà macroscopiche dei materiali.

Argomento
Il legame chimico e le curve di Condon-Morse per comprendere il suo ruolo sul principio di azione-reazione dei materiali alle sollecitazioni esterne e sul fenomeno della dilatazione termica

La struttura dei solidi: solidi cristallini e amorfi. Celle elementari. Difetti nei solidi e loro influenza su proprietà macroscopiche (vacanze, interstiziali, soluzioni solide, dislocazioni, bordi di grano).

Argomento
Altre proprietà importanti per comprendere il comportamento in esercizio dei materiali da costruzione. Proprietà chimiche: richiamo al concetto di solubilità e di pH. Esempio applicativo: la formazione di efflorescenze sulle murature.
Proprietà chimiche: la tensione superficiale, la legge di Young-Dupré. Definizione della bagnabilità attraverso il valore dell'angolo di contatto e sua conseguenza sull'aggredibilità dei materiali da costruzione. Esempio applicativo: azione di un film impermeabilizzante.
La porosità (aperta e chiusa); la risalita capillare e la dipendenza dell'altezza di risalita dal raggio dei pori aperti presenti nei materiali da costruzione. Esempio applicativo: visualizzazione del degrado indotto da fenomeni di risalita capillare.

Argomento
La curva sollecitazione-deformazione per un materiale duttile: campo elastico e campo elasto-plastico.

I parametri meccanici ricavabili dalla conduzione di una prova a trazione: modulo elastico, limite elastico, limite elastico convenzionale, limite di snervamento, resistenza a rottura, deformazione a rottura, strizione a rottura, tenacità. Le prove a compressione e a flessione: risultati ricavabili su di un materiale fragile.

Argomento
La sensibilità ai difetti dei materiali fragili: concentrazione di sollecitazione al vertice del difetto (Griffith).

Lo scorrimento viscoso dei materiali: approfondimento sul creep dei materiali metallici. Le proprietà termiche dei materiali: conduttività termica: Equazione di Fourier. Meccanismi di trasporto dell'energia termica nei materiali. Isolanti termici. Ruolo dell'aria statica.

Argomento
La dilatazione termica. Coefficiente di dilatazione termica lineare e volumica. Confronto tra vari materiali. Problematica dei giunti di espansione.

Il comportamento al fuoco dei materiali: introduzione al concetto di combustione, combustibile, comburente, potere calorifico, temperatura di ignizione, combustione completa.

Argomento
I prodotti della combustione e loro pericolosità. Le prove di validazione dei materiali nei confronti dell'incendio. Nuova normativa europea.

Comportamento per classi di materiali. Materiali polimerici combustibili e autoestinguenti: ruolo dell'indice limite di ossigeno.

Argomento
I materiali leganti: distinzione tra leganti aerei e idraulici. Definizione di pasta, malta e calcestruzzo. Fenomeni di presa e indurimento. I leganti aerei. La calce. Processo produttivo, reazioni di presa e indurimento (carbonatazione e profondità di penetrazione). Prodotti commerciali: grassello, calce idrata in polvere. Resa in grassello, calci magre e grasse. Proprietà meccaniche
Gesso: Processo produttivo, reazioni di presa e indurimento della scagliola, esotermicità ed espansività della reazione: conseguenze tecnologiche. Proprietà meccaniche e di resistenza al fuoco. Applicazione come intonaco: I prodotti commerciali: blocchi prefabbbricati in gesso, lastre in carton-gesso. Calci idrauliche, malte bastarde.

Argomento
I leganti aerei: i cementi. Processo produttivo: i costituenti mineralogici del clinker di cemento Portland. Le reazioni di idratazione dei silicati e alluminati di calcio: velocità di reazione, sviluppo del calore di idratazione e delle proprietà meccaniche.

Il gesso come regolatore di presa: ettringite primaria. La portlandite e il suo ruolo.

nota 1: Indicare quanti docenti sono simultaneamente presenti durante l'attività didattica; ogni docente è tenuto a compilare una riga completa della tabella. Eventualmente può essere omesso l'argomento se è gia presente in altra riga già compilata da altro docente;
nota 2: Se la classe di studenti è divisa in tre squadre e l'attività didattica è rivolta alla squadra due si scriverà nel box squadra di squadre l'indicazione 2 di 3.
Nota 3: Indicare solo se diverso da Italiano.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 324

I fattori ambientali di degrado. Aria e suo inquinamento: i principali inquinanti e la loro sorte in atmosfera. Acqua.

Argomento

Le cause di degrado chimico, fisico, meccanico. Interazioni nella durabilità delle strutture in cls.

Le cause chimiche di degrado: l'aggressione solfatica.

Argomento
Le cause chimiche di degrado: l'aggressione da acqua di mare e da cloruri.

Le cause chimiche di degrado: carbonatazione. Azione dell'anidride carbonica gassosa e sciolta in acqua (acque aggressive e incrostanti).

Argomento

La reazione alcali-aggregato. Fenomenologia e conseguenze.

La corrosione dei ferri d'armatura. Meccanismo e conseguenze.

Argomento
Il degrado da incendio. Degrado della pasta di cemento e implicazioni. Scoppi nel cemento.

Il ruolo della natura degli aggregati. Alterazioni cristallografiche e decomposizioni chimiche. Problematiche nel calcestruzzo armato: scorrimento viscoso, dilatazioni termiche differenziali. Il degrado da gelo e disgelo. Additivi aeranti e altri accorgimenti

Argomento

Il mix design semplice e complesso, solubile e non solubile.

L'impianto logico del mix-design: i parametri influenzanti con riguardo ai materiali coinvolti

nota 1: Indicare quanti docenti sono simultaneamente presenti durante l'attività didattica; ogni docente è tenuto a compilare una riga completa della tabella. Eventualmente può essere omesso l'argomento se è gia presente in altra riga già compilata da altro docente;
nota 2: Se la classe di studenti è divisa in tre squadre e l'attività didattica è rivolta alla squadra due si scriverà nel box squadra di squadre l'indicazione 2 di 3.
Nota 3: Indicare solo se diverso da Italiano.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 324

Scienza e Tecnologia dei Materiali - Docente: Prof.ssa Laura Montanaro
Introduzione al corso, ai materiali e alle curve di Condon-Morse

Metalli → elementi metallici
Metalli pure e leghe (metallo base con elementi in lega –alliganti- metallici o non metallici: Leghe Al-Cu, Leghe Fe-C)

Ceramici → eccezion fatta per C (diamante, grafite,..), $(Me)_n(non\text{-}Me)_m$
Al_2O_3, ZrO_2, SiO_2 (ossidi)
SiC, Si_3N_4 (non ossidi)

Polimeri → lunghe catene di atomi di C

Legame chimico → **CURVE DI CONDON - MORSE**
→ RIGIDITA'
→ DILATAZIONE TERMICA α

Risposta meccanica dei materiali
Materia concentrata in piccole regioni → ruolo della Energia → principio di azione-reazione

Materiali resistono a sollecitazioni esterne DEFORMANDOSI

2 tipi di deformazioni:
a) reversibili, recuperabili appena lo stress esterno si annulla → deformazione ELASTICA
b) irreversibili, non più recuperabili anche se lo stress esterno si annulla → deformazione PLASTICA

2 diversi comportamenti:
a) solo def. elastiche fino a rottura → materiali FRAGILI (come i ceramici)
b) def. sia elastiche che plastiche prima di rompersi → materiali DUTTILI (come i metalli)

Differenza tra "*fragile*" e "*brittle*" che in Italiano traduciamo con la stessa parola: fragile

"*Fragile*" : materiale che si rompe sotto stress esterni contenuti → materiale poco resistente

"*Brittle*" : materiale che si rompe avendo sperimentato solo deformazioni elastiche, reversibili (fragile come un ceramico).

Non necessariamente un materiale "*brittle*" è anche "*fragile*"

Il diamante subisce deformazioni solo elastiche (è *brittle*, fragile) ma non è certo poco resistente (non è *fragile*)

Il vetro da finestra è sia brittle che fragile, perché subisce deformazioni solo elastiche (è *brittle*, fragile) ma è anche poco resistente (è *fragile*)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 324

Scienza e Tecnologia dei Materiali - Docente: Prof.ssa Laura Montanaro
Introduzione al corso, ai materiali e alle curve di Condon-Morse

Legami

- Forti — metallico, covalente, ionico
- Deboli (secondari) — interazioni dipolari (di Van der Waals)

Legame metallico → Metalli

- Elettroni liberi
- Elettrostatico → ADIREZIONALE
- Energeticamente forte

Legame covalente → Ceramici (prevalente su ionico)

- Elettroni non liberi
- Direzioni definite → DIREZIONALE
- Energeticamente molto forte

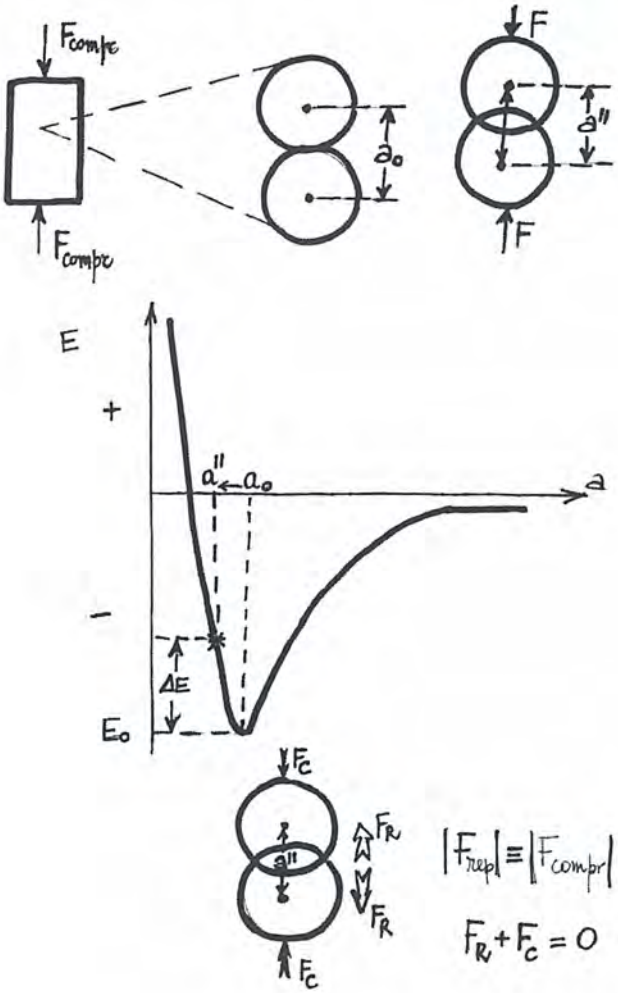
Legame VdW → Polimeri

- Elettroni non liberi
- Energeticamente debole/molto debole
- Condizionato da posizioni reciproche tra catene: non permanente

→ agitazione termica → proprietà = f(T)

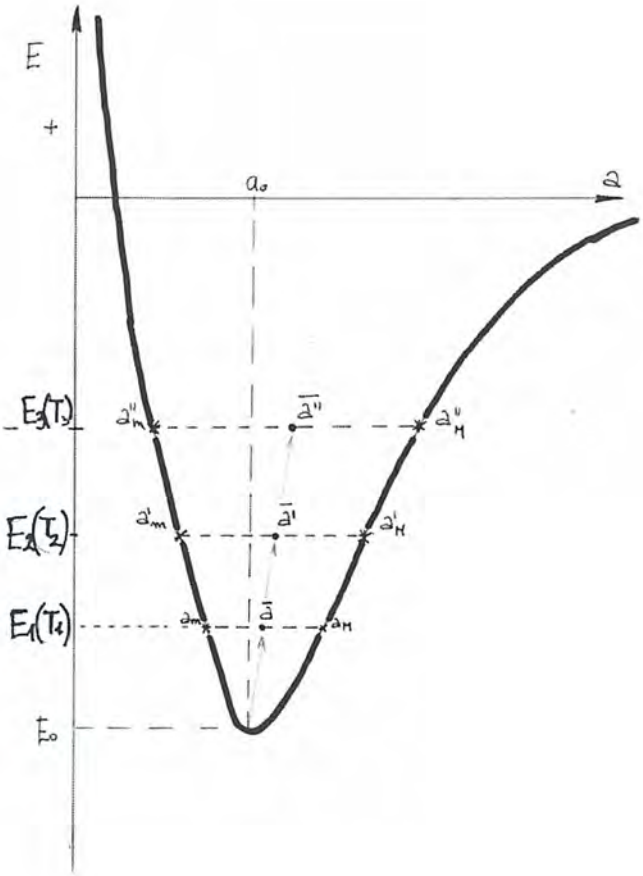
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 324



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 324



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 14-03-2011

LIBRO DI TESTO: A. Negro et al., scienza e tecnologia dei materiali

VIRTLAB (come supporto di studio e verifica)

http://didattica.polito.it/pls/portal30.....

CONSULENZE: contattare per e-mail (da indirizzo istituzionale a laura.montanaro@polito.it)

COSA È LA SC. e TECN. DEI MATERIALI?

Disciplina ingegneristica di base.

Conoscere i materiali:

→ per operare scelte corrette

→ per progettare (tailoring) nuovi materiali.

tailor: in inglese significa "SARTO"

Sono disponibili commercialmente più di 160 000 materiali.

Non è possibile conoscere tutti i materiali ⇒ linee-guida per la conoscenza e la scelta.

COME DEFINIAMO UN MATERIALE?

"Non c'è laboratorio più grande del mondo che ci circonda"

Materiale: qualsiasi solido in grado di svolgere almeno una determinata funzione (meccanica, termica, ottica, magnetica, elettrica ...)

Stiamo comunque cominciando a gestire anche un liquido e un gas, ed anche il quarto stato di aggregazione: plasma

LATTINA COCA-COLA	1° BOTTIGLIA COCA-COLA	2° BOTTIGLIA COCA-COLA
metallo: lega di alluminio	ceramica: vetro a base di silice	PET (polietilen tereftalato)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 324

Uno dei ceramici più noti è Al_2O_3 (allumina)
Infatti per ottenere un ceramico bisogna sempre combinare elementi metallici con elementi non metallici.

MATERIALI INORGANICI : metalli e ceramici
MATERIALI ORGANICI : materiali plastici o polimeri

METALLICI

Il legame metallico è un legame ad elettroni di valenza delocalizzati.
Per ottenere materiali amorfi bisogna effettuare il raffreddamento ad una velocità di : $V_{raffr} = 10^6\ °C/s$:
infatti se la vel. è lenta ⇒ gli atomi si organizzano in strutture ordinate (cristalli).

non stechiometriche : cioè senza rapporti fissi.

Acciai / ghise : $Fe - C$ (quantità variabili: non stechiometricam. definite)
Fe ↑ mattone da costruzione; C ↖ elemento non metallico

Duralluminio $Al - Cu$
Al ↑ metallo base; Cu ↖ ALLIGANTE

Acciai inox: $Fe - C - \underbrace{Cr\ (Ni)}$
↓ cromo e nichel servono per non fare arrugginire l'acciaio

→ LEGHE (è molto difficile produrre metalli amorfi ⇒ i metalli vengono utilizzati per formare le leghe)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 324

VETRI BORO SILICATICI (resistenti ai salti termici):
es: vetri Pyrex ®

CERAMICI { OSSIDICI: contengono come non-metallo l'ossigeno
NON OSSIDICI: contengono come non-metallo

Alto punto di fusione perché c'è presenza del legame covalente.

DEFORMAZIONI ELASTICHE: deformazioni reversibili ⇒ FRAGILITÀ

Si formano a partire da delle polveri che vengono impastate e non possono essere formate a partire dal fuso (dal fuso solo per i vetri)

[SILICATICI: perché all'interno compare sempre SiO_2]

N.B.

Gli atomi e i legami che li tengono insieme influenzano tantissimo le proprietà del materiale

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 324

Generalità

Consulenze su appuntamento tramite E-mail (da indirizzo istituzionale ….@studenti.polito.it) a: laura.montanaro@polito.it

Esame: prova scritta (4 domande a risposta aperta; 2 da 5 punti cadauna, 2 da 10 punti cadauna, suddivise in parti).

Cosa è la Scienza e la Tecnologia dei Materiali?

Disciplina ingegneristica di base

Conoscere i materiali

→ per operare scelte corrette

→ per progettare (tailoring) nuovi materiali

Sono disponibili commercialmente più di 160000 materiali

Come operare la migliore selezione in un catalogo così vasto?????

Non è possibile conoscere tutti i materiali → linee-guida per la conoscenza e la scelta

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 324

Classificazione dei Materiali

- **Naturali**, di origine geologica (pietre, rocce, argille, ..) o chimica (cellulosa, caucciù, carbone, ..),
- **Sintetici** (metalli ottenuti per trattamento dei minerali, ceramici, materie plastiche, ..)

Metalli (Fe, Al, Cu, Mg, Ti) e loro Leghe (Acciai, Ghise, Ottoni, Bronzi....)

Ceramici tradizionali e ingegneristici

Materie plastiche
Termoplastici
Termoindurenti
Elastomeri o Gomme

Compositi: CMC, MMC, PMC

Prof. L. Montanaro - STM - Ing. Civile 7

Metalli: materiali inorganici metallici

Ampio gruppo di elementi chimici caratterizzati da un numero variabile di elettroni di valenza delocalizzati (**legame metallico**).

Organizzazione degli atomi in strutture ordinate (cristalli). Molto difficile produrre metalli amorfi.

Leghe (combinazioni – non stechiometricamente definite - di due o più metalli o non metalli), quali le ghise e gli acciai (leghe a base Fe-C), le leghe di Al (duralluminio: Al-Cu), Ti, Mg, Ni, Zn, Cu (ottoni, leghe Cu-Zn, e bronzi, leghe Cu-Sn).

Prof. L. Montanaro - STM - Ing. Civile 8

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 324

Ceramici: Materiali inorganici non metallici

Tipologia di ceramico	Esempi
Ossidico silicatico	Refrattari silicei, silico-alluminosi, mullitici (mullite: $3Al_2O_3.2SiO_2$); costituenti del cemento Portland (silicati di calcio); **silice** SiO_2 e vetri silicatici
Ossidico non silicatico	**Allumina** Al_2O_3, Magnesia MgO, Spinello $MgO.Al_2O_3$, **Zirconia** ZrO_2, Titanato di bario $BaTiO_3$, Biossido di uranio UO_2, Toria ThO_2, Ferrite di nichel $NiFe_2O_4$
Non ossidico	**Carburo di silicio** SiC, Nitruro di silicio Si_3N_4, Carburo di titanio TiC, Carburo di tungsteno WC, Nitruro di boro BN, Carburo di boro B_4C, **Diamante e Grafite** C

Ceramici: Materiali inorganici non metallici

- Isolanti termici ed elettrici
- Generalmente altofondenti (T_f allumina = 2054°C; T_f zirconia = 2680°C; T_f silice = 1710°C)
- Resistono bene alle alte temperature (**refrattarietà**: mantenere inalterate caratteristiche chimico-fisico-meccaniche anche se esposti per lungo tempo ad alte T)
- Resistono bene agli ambienti aggressivi (inerzia chimica)
- Possono presentare elevate caratteristiche meccaniche e elevata durezza
- Sono fragili: si rompono dopo essersi deformati solo in modo reversibile (deformazioni elastiche)
- Formatura prevalentemente da polveri (da fuso solo per i vetri)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 324

COMPOSITI

Effetto sinergico: ottenere un materiale con una qualità superiore a quella dei due o più materiali utilizzati per ottenere il materiale finale

LEGNO
- MATRICE ORGANICA: lignina
- RINFORZO: fibre di cellulosa

Le fibre sono orientate lungo una certa direzione ⇒ ANISOTROPIA

CMC e MMC: utilizzati per scopi tecnologici e di alto profilo

Polimeri rinforzati attraverso la dispersione di fibre: GFRP e CFRP

Fibre Kevlar® → è un marchio depositato (®): trade mark

il Kevlar è una fibra

LA RISPOSTA MECCANICA DEI MATERIALI OVVERO.... PERCHÉ I MIEI PIEDI NON SPROFONDANO NEL PAVIMENTO?

Nucleo atomo: "assimilabile" al pallone da calcio al centro di uno stadio

Nei nostri materiali c'è molto più vuoto che materia

FOTOGRAFIA (fatta vedere a lezione): parti bianche: nucleo più elettroni intorno ad esso
parti nere: vuoto

⇒ la materia è concentrata in piccole unità di volume, tutto il resto è vuoto ⇒ i piedi non sprofondano nel pavimento, perché ci sono i legami chimici, che sono energia.

I materiali dilatano e contraggono termicamente.

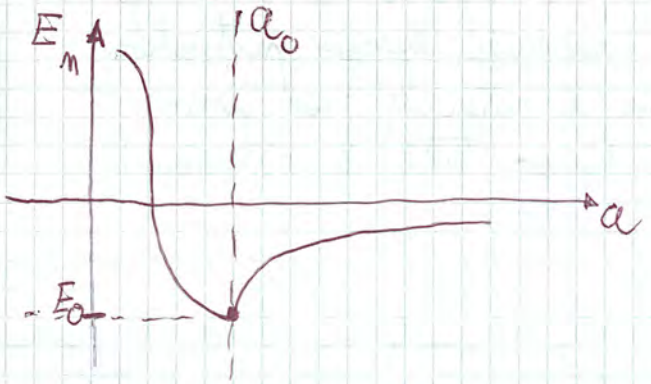
— PAG. 3

LEGAME METALLICO: energeticamente forte, è un legame elettrostatico (perché ci sono ioni positivi metallici ed elettroni delocalizzati) e questo fa sì che il legame sia adirezionale, cioè il legame ha la stessa energia per ogni direzione; è un legame ad elettroni liberi.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 324

Il minimo di energia corrisponde ad un massimo di stabilità (DISTANZA DI LEGAME)



a_0: distanza di legame
E_0: energia di legame

$$E_T = \int_0^{\infty} F_T \, da$$

cioè l'energia che si libera quando si forma il legame.
E_0 è l'en. di legame, ed è anche l'energia che deve essere fornita dall'esterno al materiale per rompere il legame.

SFORZO o SOLLECITAZIONE: STRESS
La risposta dei materiali allo stress si traduce in una deformazione.
DEFORMAZIONE: variazione geometrica e dimensionale del materiale.

DEFORMAZIONE REVERSIBILE o RECUPERABILE o ELASTICA: è comune a tutti i materiali

DEFORMAZIONE IRREVERSIBILE o NON PIÙ RECUPERABILE o PLASTICA: non è comune a tutti i materiali, ma solo ad alcuni; porta a variazioni geometriche e dimensionali permanenti.

MATERIALI FRAGILI: subiscono solo deformazioni elastiche fino a rottura
MATERIALI DUTTILI: subiscono deformazioni sia elastiche sia plastiche prima di rompersi

In italiano FRAGILE; in inglese:
FRAGILE ("frajail"): materiale poco resistente meccanicamente
BRITTLE ("brittol"): materiale soggetto a deformazione solo elastica, prima di rompersi; però il termine "brittle" non ci dice se lo stress è alto o basso"

BRITTLENESS: rigidezza

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 324

A noi interessa che le strutture si deformino sì in modo reversibile, ma anche in modo molto contenuto.
L'entità della deformazione elastica sarà indicata dalla RIGIDEZZA (che sarà quantificata dal modulo di elasticità di Young E).

La curva della ceramica è più profonda, perché c'è presenza del legame covalente, che è il legame energeticamente più forte.
Deformo elasticamente della stessa entità i tre materiali, devo quindi consumare diversa energia.
A parità di deformazione elastica, la ceramica richiede uno stress esterno maggiore.

Ce ⊕ rigido dei | Me ⊕ rigido dei | Po

⊕ rigido: in grado di resistere agli stress (stessi) esterni dando luogo ad una deformazione più contenuta rispetto ad un materiale meno rigido.

DEFORMAZIONE REVERSIBILE IN ASSENZA DI SOLLECITAZIONE: LA DILATAZIONE TERMICA SLIDE 20

Comunemente i materiali aumentano di volume al riscaldamento e contraggono di volume al raffreddamento.

a_0, E_0 identifica immobilità assoluta, cioè assenza di energia cinetica. Questa condizione si verifica allo 0 assoluto (-273 °C)

Se aumenta la temperatura vuol dire che ho fornito energia: energia termica. Fornendo energia termica al materiale, accade che gli atomi che prima erano immobili cominciano a oscillare ed oscillano dalla posizione $a_{min\,1}$ alla posizione $a_{max\,1}$
["L'intercetta isoenergetica che passa per E_1"]
Aumentando la temperatura, le oscillazioni diventano più ampie.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 324

COEFF. DI DILATAZIONE TERMICA LINEARE α ($\alpha_{polimeri} > \alpha_{metalli} > \alpha_{ceramici}$)

Si misurano con prove di DILATOMETRIA in laboratorio.
Si prende un oggetto (provino); ne si misura una direzione (la dir. prevalente: di solito lunghezza) e si misura anche la sua temp. All'interno del dilatometro l'oggetto viene sottoposto ad un ciclo termico controllato e la sua lunghezza va da l_0 a l_1.

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon$$

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\Delta T} \quad [°C^{-1}]$$

Infisso: accoppiata di materiali che dilatano in modo differente.

ASFALTO (materiale di natura organica, polimerica (viene dal petrolio)) e GIUNTO DI ESPANSIONE

dilata molto di più del calcestruzzo armato (che è un materiale ceramico)

Se ci fosse un manto continuo, l'asfalto dilaterebbe molto di più del calcestruzzo sottostante e dunque avremmo un asfalto tutto ondulato. Ecco perché ci sono le giunzioni (ci sono interruzioni nel manto stradale).

ORGANIZZAZIONE DEGLI ATOMI NEI SOLIDI: STRUTTURA CRISTALLINA e STRUTTURA AMORFA.

$\boxed{\text{ATOMI: SFERE RIGIDE}}$

Quando gli atomi si impaccano in modo regolare descrivendo figure geometriche semplici e ripetitive nello spazio ⇒ CRISTALLO

Se non ci sono figure geometriche in grado di descrivere l'impaccamento e tale impaccamento varia da punto a punto (non è ripetitivo nello spazio) ⇒ AMORFO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 324

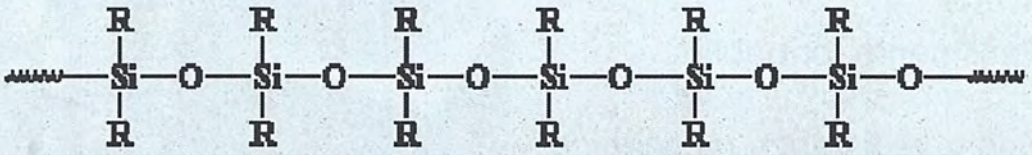
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 324

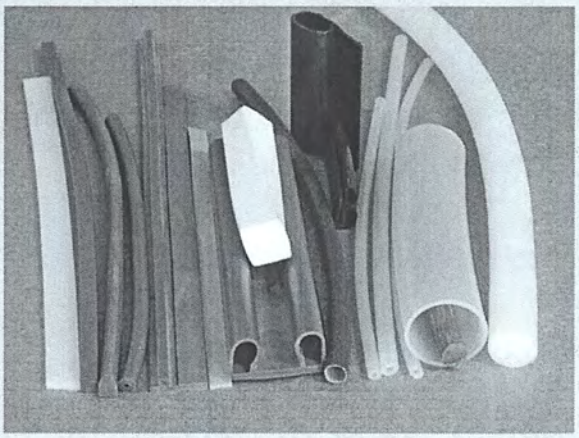
Materie plastiche - Polimeri

Materiali organici costituiti da lunghe catene molecolari (macromolecole) nelle quali uno o più gruppi (detti monomeri) si ripetono concatenandosi.
Molti polimeri sono costituiti unicamente da carbonio ed idrogeno; altri contengono anche ossigeno e/o azoto e/o fluoro.

Materie plastiche - Polimeri

Siliconi: polimeri con catene a base di Si e non di C.





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 324

Riciclo a fine vita

ACC (o FE) = acciaio; AL (o ALU) = alluminio;
CA = carta; PE = polietilene;
PET (PETE) = polietilene tereftalato;
PP = polipropilene; PS = polistirene;
PVC (o V) = polivinilcloruro; VE = vetro;
ABS = acrilonitrile butadiene stirene

Compositi

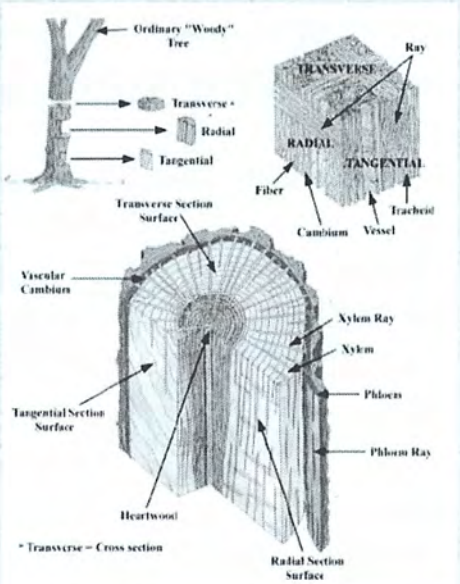
Combinazioni di due o più materiali diversi, finalizzate all'accoppiamento delle migliori caratteristiche di ciascuno di essi (effetto sinergico)

→ Matrice

→ Rinforzo

. Civile

Composito naturale: legno, nel quale la matrice di lignina è rinforzata dalle fibre cellulosiche



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 324

La risposta meccanica dei materiali

ovvero … perché i miei piedi non sprofondano nel pavimento?

Materia ← → Energia → Legami chimici

Caratteristiche del legame chimico influenzano:

- Temperatura di fusione
- Conduttività termica ed elettrica
- Dilatazione termica
- Rigidezza
- Resistenza a rottura
- Duttilità o fragilità

……

Tipi di Legami

• Forti	metallico, covalente, ionico
• Deboli	interazioni dipolari (di Van der Waals) (secondari)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 324

Legame secondario (POLIMERI)

Energeticamente debole
- → Bassa-bassissima Rigidezza
- → Bassa-bassissima Resistenza a rottura
- → Bassa-bassissima Temperatura "*di fusione*"
- → Elevata Dilatazione termica

Elettroni NON liberi e meccanismi di trasporto termico/elettrico meno efficienti che nelle ceramiche
- → I MIGLIORI ISOLANTI termici
- → I MIGLIORI ISOLANTI elettrici

Molte proprietà diverse tra TP, TI e Elastomeri….

Proprietà anche dipendenti da T

Legame chimico → **CURVE DI CONDON - MORSE**
→ RIGIDEZZA (E)
→ DILATAZIONE TERMICA α

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 324

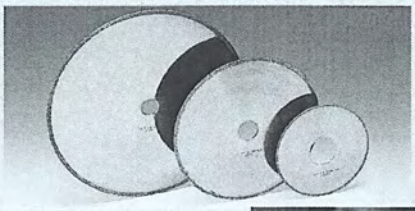
Differenza tra "*fragile*" e "*brittle*" che in Italiano traduciamo con la stessa parola: fragile

"*Fragile*" : materiale che si rompe sotto azioni (sollecitazioni, stress, sforzi) esterne contenute → materiale poco resistente

"*Brittle*" : materiale che si rompe avendo sperimentato solo deformazioni elastiche, reversibili (fragile come un ceramico).

Non necessariamente un materiale "*brittle*" è anche "*fragile*"

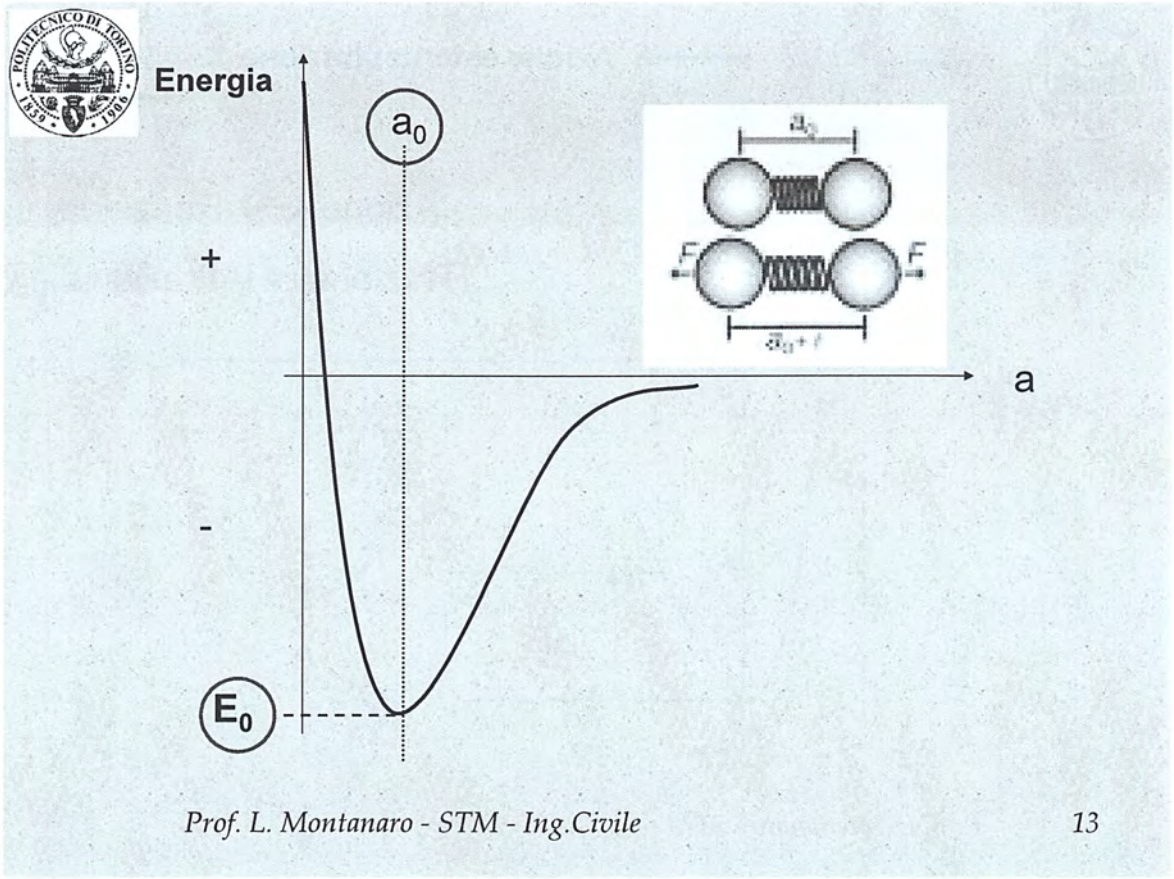
Il diamante subisce deformazioni solo elastiche (è *brittle*, fragile) ma non è certo poco resistente (non è *fragile*)

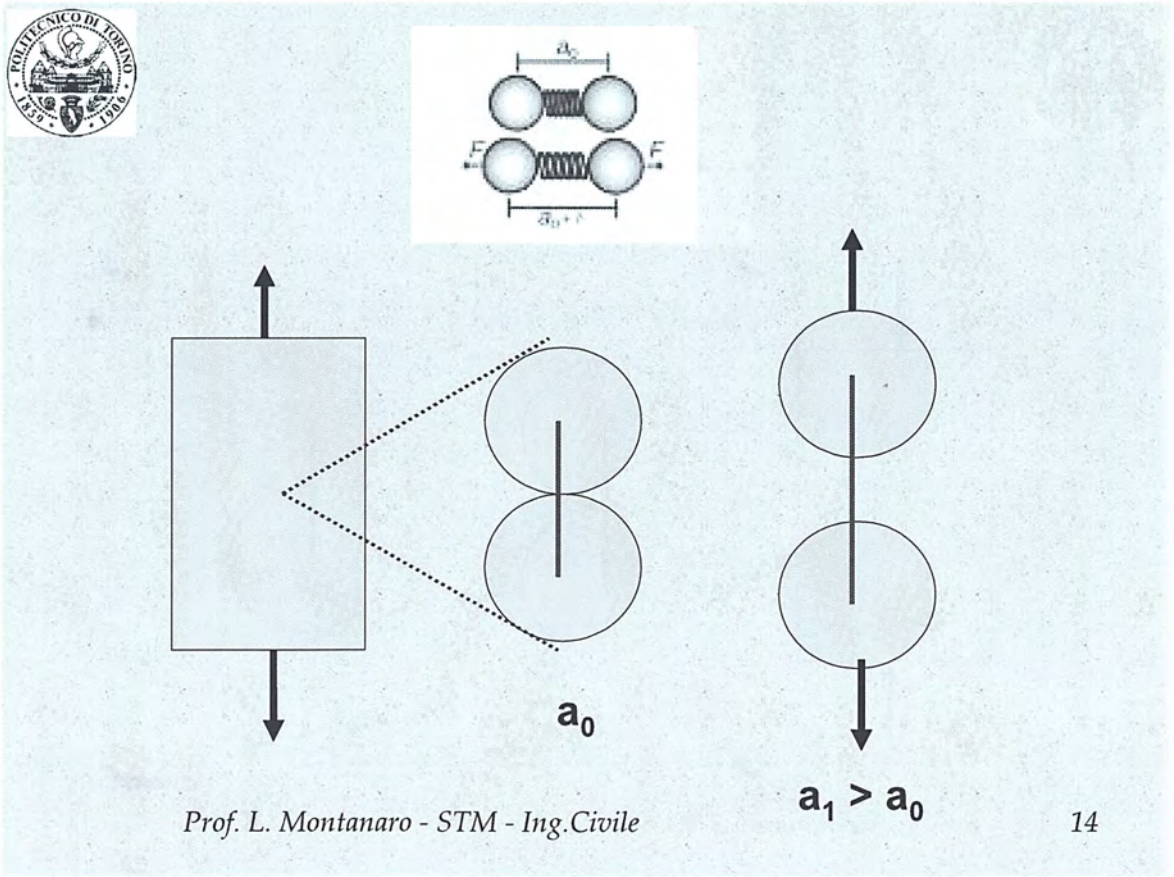


Il vetro da finestra è sia *brittle* che *fragile*, perché subisce deformazioni solo elastiche (è *brittle*, fragile) ma è anche poco resistente (è *fragile*)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 324

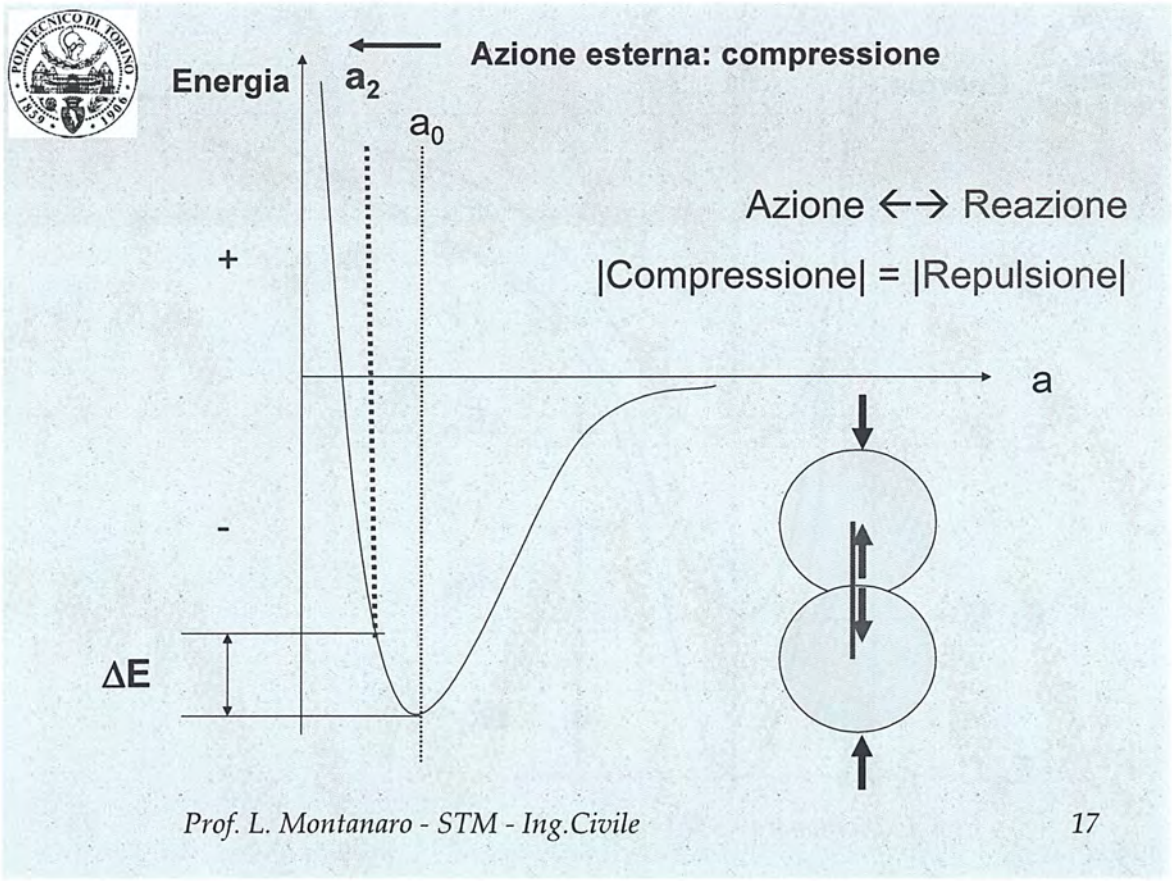
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 324



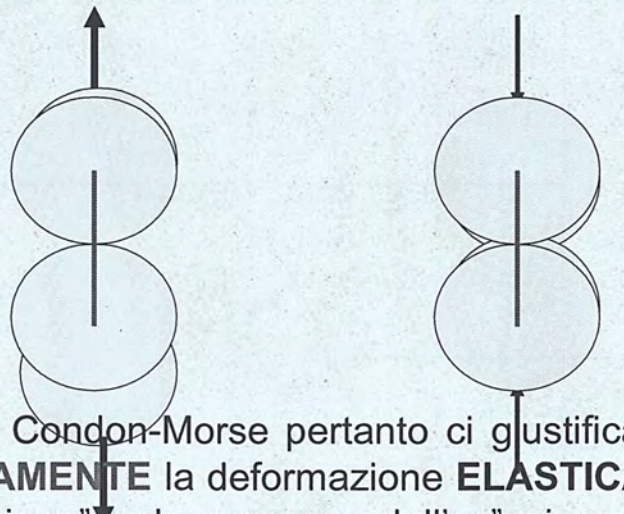


© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 324



La deformazione è reversibile perché se l'azione esterna viene a cessare l'energia che tiene uniti i due atomi li richiama nelle rispettive posizioni di partenza

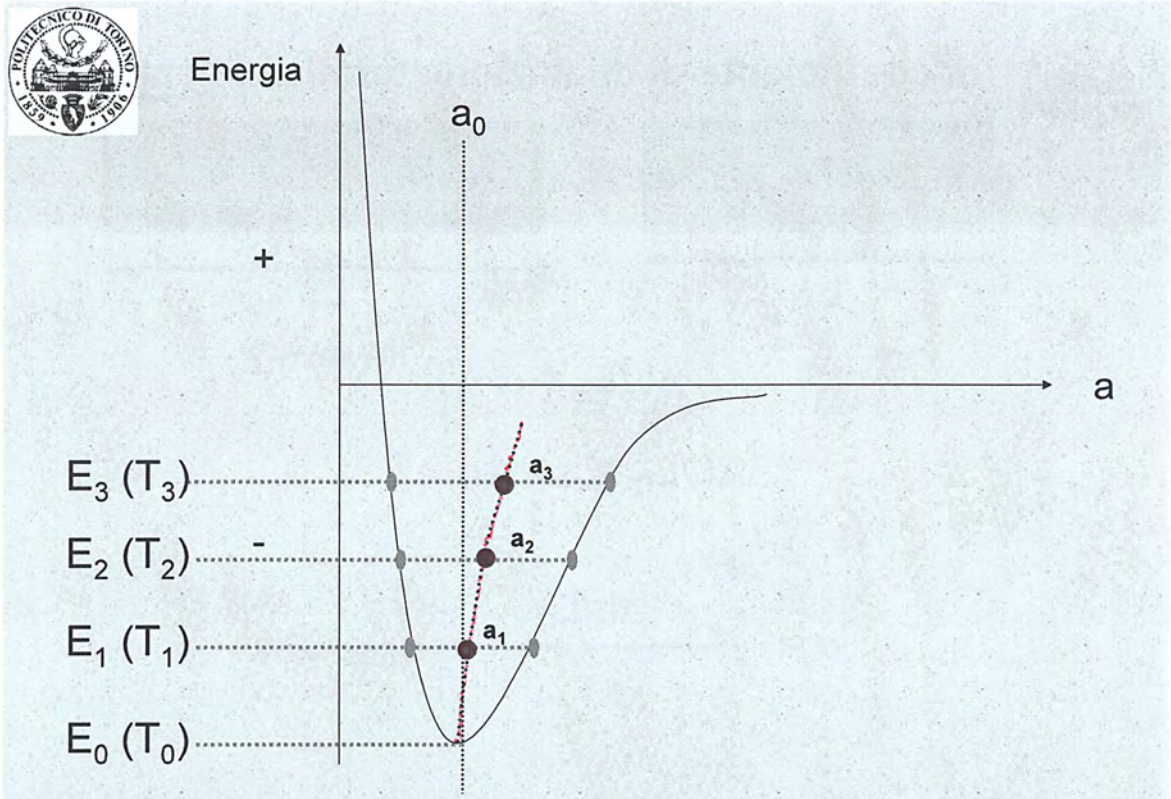


Le curve di Condon-Morse pertanto ci giustificano **SOLO** ed **ESCLUSIVAMENTE** la deformazione **ELASTICA** (reversibilità della "reazione" al cessare dell' "azione esterna" di perturbazione) che è propria di tutti i materiali.

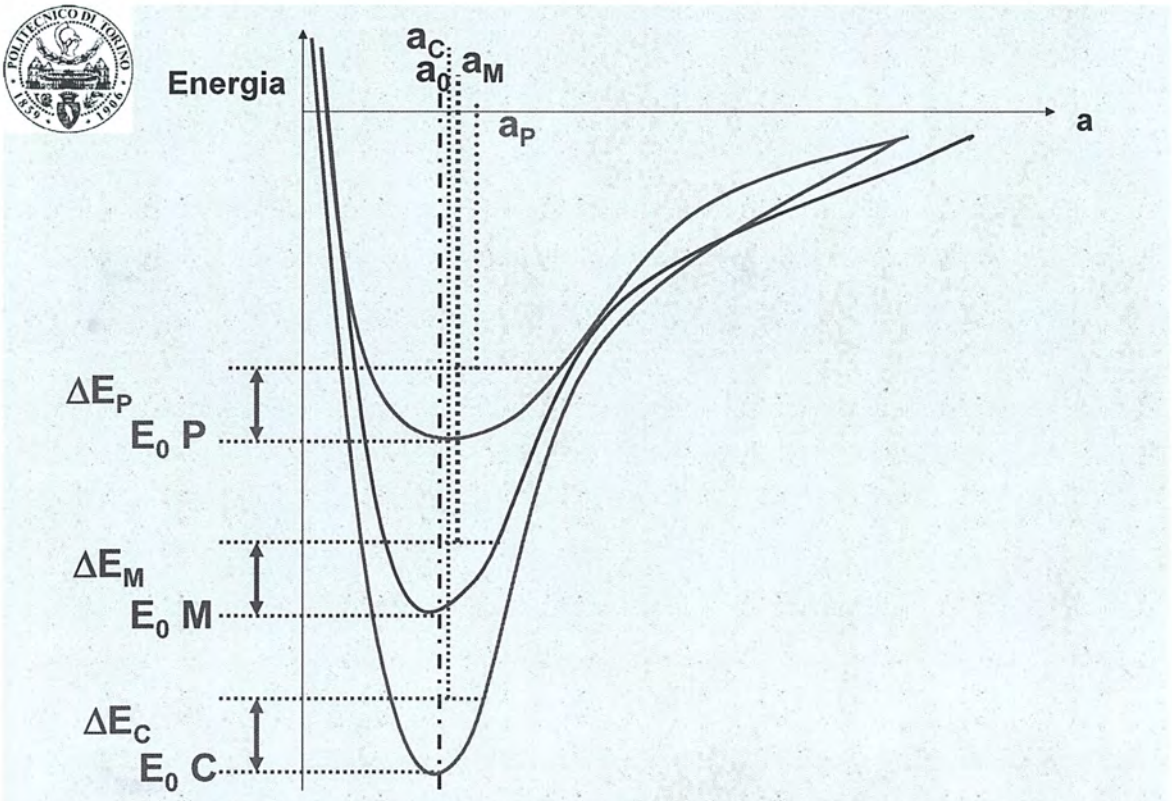
Prof. L. Montanaro - STM - Ing.Civile 18

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 324



Prof. L. Montanaro - STM - Ing.Civile 21



Prof. L. Montanaro - STM - Ing.Civile 22

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 21-03-2011

PAG. 12

Gli atomi si organizzano tridimensionalmente secondo due possibili schemi:
- CRISTALLO (geometria unica e ripetitiva)
- AMORFO (geometria caotica)

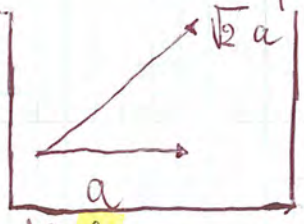
Dalla CELLA ELEMENTARE, per traslazione, otteniamo il RETICOLO CRISTALLINO

CRISTALLO

SOLIDO MONOCRISTALLINO: crea l'oggetto andando a ripetere per tutta la dimensione dell'oggetto, quel particolare impaccamento.

[CRISTALLO DI QUARZO e CRISTALLO DI DIAMANTE]

ANISOTROPIA: valore di una proprietà dipendente dalla direzione lungo la quale si misura.



Il legno non è un solido monocristallino, ma è comunque anisotropo, perché ci sono fibre. I valori delle proprietà del legno lungo la direzione parallela alle fibre sono diversi dai valori delle stesse proprietà lungo la direzione perpendicolare alle fibre.

$P_{//} \neq P_{\perp}$

Il VETRO DI SILICE è ISOTROPO essendo un solido amorfo, perché le distanze geometriche tra gli atomi non sono precise, ma la caoticità fa sì che il valor medio delle distanze

È più semplice progettare con i materiali isotropi rispetto a materiali anisotropi.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 324

Ferro α: ferrite
Ferro γ: austenite
La transizione da α e γ caratterizzerà gli acciai.

Ti : α (EC) ⟷ β (CCC)

la doppia freccia indica perfetta reversibilità

PAG. 13

I cristalli REALI non sono perfetti (come i cristalli IDEALI), ma presentano difetti (ANOMALIE) e questi difetti permettono ai materiali di avere proprietà che altrimenti non avrebbero.

Andiamo da difetti di taglia atomica a difetti di dimensioni quasi macroscopiche.

- difetti adimensionali
- difetti monodimensionali: una fila di atomi è difettuale
- difetti bidimensionali
- difetti tridimensionali: es: assenza di materia: POROSITÀ (cementi e calcestruzzi)

Ciascuno di questi difetti comporta una particolare proprietà:
I difetti puntuali ci giustificheranno il perché possiamo ottenere le LEGHE
I difetti di linea " alcuni materiali sono DUTTILI
I difetti superficiali " si formano solidi POLICRISTALLINI

DIFETTI PUNTUALI

VACANZA: difetto adimensionale (cioè riguarda un solo punto del reticolo cristallino): mancanza di un atomo

DIFETTO INTERSTIZIALE: gli interstizi del reticolo cristallino sono i vuoti di tale reticolo.
Se in uno di tali interstizi c'è un atomo ⇒ si ha un difetto interstiziale

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 324

quando un atomo di soluto occupa una vacanza

SOLUZIONE SOLIDA INTERSTIZIALE: un atomo di soluto si mette in un interstizio del reticolo del solvente

SOSTITUZ. (perché le dimensioni di tali atomi sono circa come quelle degli atomi di ferro).

Fe - C - Cr - Ni

Fe → SOLVENTE

C, Cr, Ni → SOLUTI

C → INTERST.

Quindi ci può essere contemporanea presenza di sostituzionalità e interstizialità.

REGOLE DI HUME-ROTHERY:

- stessa valenza
- stesso reticolo cristallino
- simile elettronegatività [ricordare che non esistono atomi diversi con stessa elettronegatività]
- differenza tra raggi atomici < 15 %

Per una soluzione solida sostituzionale si può avere:

MISCIBILITÀ TOTALE: posso andare dal rame puro al nichel puro passando per tutto il range composizionale delle soluzioni solide che vanno dal 100% di rame al 100% di nichel.

MISCIBILITÀ PARZIALE: es: Al e Cu; è tanto più marcata quanto più i due atomi non rispettano le quattro regole di Hume-Rothery.

IMMISCIBILI in S.S.S. (soluzione solida sostituzionale)

- **COMPLETAMENTE**: gli atomi non possono mescolarsi in nessun modo; non daranno mai vita a soluzioni solide.
- **PARZIALMENTE**: gli atomi di ferro e carbonio possono dare una soluzione solida interstiziale, dato che gli atomi di carbonio sono più piccoli di quelli di ferro.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 324

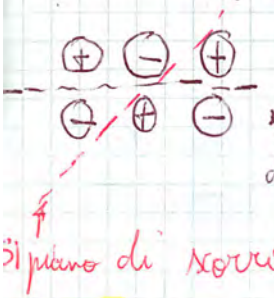
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 324

- DENSIFICAZIONE (SINTERIZZAZIONE) DEI CERAMICI: le ceramiche si ottengono a partire da polveri ⇒ poi le lavoro con acqua ed ottengo componente crudo ⇒ continua ad essere incoerente (è una "terra bagnata").
Per passare ad un materiale con determinate proprietà devo cuocere il componente crudo (non per niente si parla di terre cotte).
Durante la cottura i granelli diffondono e si saldano l'uno all'altro.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 324

Il cloruro di sodio è classificabile come materiale ceramico (metallo-non metallo), però nel solido cloruro di sodio il legame che prevale è ionico (legame elettrostatico)



Non può avvenire scorrimento lungo questo piano, perché si avrebbe ⊕ ⊖ e quindi repulsione e il materiale si spezzerebbe.

N.B. NON DIRE ALL'ESAME che la dislocazione è la linea blu, ma quella rossa (vedi VirtLab).

Gli interstiziali sono in grado di interagire con le dislocazioni, per ostacolarne un po' il moto, infatti si aggiungono alla dislocazione e dunque ci vuole più energia per il movimento.
Quando noi creiamo le leghe da un metallo puro, il metallo puro è molto più duttile delle leghe, poiché il soluto sostitutivo tende ad "ostacolare", a rendere più difficile il moto delle dislocazioni

La duttilità di un materiale è una proprietà ESTRINSECA, cioè modificabile.

DIFETTO DI SUPERFICIE DETTO BORDO DI GRANO PAG. 18

La maggior parte degli oggetti è costituita da tanti cristalli, si trattano cioè di solidi POLICRISTALLINI

Ognuno di questi cristalli prende il nome di GRANO CRISTALLINO.
Ognuno dei cristalli è equivalente agli altri, ma sono orientati spazialmente in modo differente (es: FERRO PURO con cristalli tutti cubici a facce centrate, ma con orientamento differente).
I BORDI DI GRANO permettono di dare continuità a cristalli orientati in modo differente.

I materiali policristallini possono essere formati da più cristalli dello stesso tipo (es: FERRO PURO) o di diverso tipo.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 324

PROPRIETÀ CHIMICHE PAG. 91

- SOLUBILITÀ
- IONIZZAZIONE e pH
- PRECIPITAZIONE

SOLUBILITÀ: è definita dal prodotto di solubilità; è una grandezza funzione della temperatura.

Il carbonato di calcio ($CaCO_3$) lo ritroveremo nelle cala carel ed anche all'interno del calcestruzzo (fenomeno di degrado: CARBONATAZIONE).

BICARBONATO DI CALCIO ($Ca(HCO_3)_2$): sale acido del carbonato di calcio), molto più solubile del $CaCO_3$.

La solubilità del gesso* è maggiore di quella della calce, quindi è consigliato per i rivestimenti interni e non per quelli esterni.

* Solfato di calcio idrato $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Il pH fortemente basico non è deleterio per le armature del calcestruzzo; se il pH scende sotto al 9, l'acciaio delle armature subisce corrosione.

Quando supero il prodotto di solubilità ⇒ ho precipitazione.
Noi faremo sempre riferimento all'acqua come liquido.

PRECIPITAZIONE SUI MATERIALI DA COSTRUZIONE: efflorescenza su laterizio faccia a vista.

PAG. 137-143

VEDI CHIARIMENTO IN FONDO AGLI APPUNTI ← EFFLUORESCENZE: DEPOSITI, soluti precipitati sul muro; l'acqua è arrivata sul muro, è evaporata ed ha lasciato i depositi, i sali (che sono bianchi è carbonato di calcio).

dipende dai fenomeni di SOLUBILIZZAZIONE e PRECIPITAZIONE

conseguenze = danneggiamento estetico del materiale e inoltre segno di degrado, perché

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 324

EQUAZIONE DI LAPLACE (nella forma semplificata)

Consideriamo una gocciolina d'acqua nell'aria: assume la forma sferica perché tale forma minimizza l'estensione dell'interfaccia liquido - aria. Il raggio di tale sfera tende ad essere il più piccolo possibile ⇒ abbiamo la tendenza a diminuire il volume (sempre per diminuire l'interf. = faccia)
Le molecole d'acqua dunque si avvicinano e si urtano molto più frequentemente tra di loro; aumenta così la pressione (interna alla gocciolina).
La pressione (tende ad aumentare la superficie dell'interfaccia, il volume della goccia) si oppone alla diminuzione di volume ⇒ equilibrio.

BAGNABILITÀ DEI SOLIDI PAG. 29

Facciamo cadere una goccia su un solido. Abbiamo la presenza di tre fasi: SOLIDO - LIQUIDO - GAS e si tende a ricercare una condizione di equilibrio.

TRE FASI ⇒ TRE INTERFACCE ⇒ $\underbrace{\gamma_{SV},\ \gamma_{LS},\ \gamma_{LV}}$

FIG. 3.9(b) PAG. 29 3 TENSIONI SUPERFICIALI

Sezioniamo la lenticola; la lenticola si forma perché si deve raggiungere la condizione di equilibrio tra le 3 fasi; la cond. di eq. è definita dalla LEGGE DI YOUNG - DUPRÉ:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta$$

→ Vengono definite le condizioni di equilibrio tra le tre tensioni superficiali.

θ = angolo di contatto

$\theta < 90°$ solido idrofilo (liofilo) → idro = acqua, filo = amico, lio = liquido

$\theta > 90°$ solido idrofobo (liofobo) ⇒ l'interfaccia solido - liquido è sfavorita e si dice che il liquido non bagna la superficie del solido.

← gocciolina d'acqua: forma lenticolare

← gocciolina di mercurio: forma sferica ⇒ il mercurio tende a favorire il contatto con il gas, minimizzando la superficie di contatto (interfaccia) con il solido.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 324

CONSEGUENZE DELLA POROSITÀ

Sia nel caso di por. aperte che chiuse ⇒ la porosità riduce le resistenze meccaniche di circa il 5%, poiché la porzione di vuoto (pori) non è in grado di resistere agli stress esterni.

La seconda conseguenza è sulla durabilità di esercizio. La porosità chiusa ha poco effetto sulla durabilità (poiché i pori non sono interconnessi). Una porosità aperta rappresenta invece un canale di accesso per gli aggressivi ⇒ la durabilità diminuisce.

POROSITÀ ε : $\varepsilon = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}$

cioè i valori alti di porosità

Le porosità alte, rappresentano POROSITÀ APERTE (vedi figura 3.13)

La porosimetria a mercurio è la tecnica che, grazie al porosimetro, permette di misurare la porosità di un materiale.
Il mercurio non bagna la sup. della maggior parte dei solidi ($\theta \cong 140°$) ⇒ non penetra nel materiale. Per farlo penetrare dobbiamo aumentare la pressione.
C'è una inversa proporzionalità tra la pressione applicata ed il raggio del poro che viene penetrato (una pressione piccola fa sì che il mercurio penetri in un poro con grande raggio).

POROGRAMMA: ci definisce la distribuzione dimensionale dei pori ed il volume dei pori presenti

EQZ. DI WASHBURN : $P \cdot r = cost$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 324

Formazione ed effetti

Condizione necessaria alla formazione dell'efflorescenza è la presenza contemporanea di sali solubili e di acqua.
Le efflorescenze infatti sono dovute ai sali solubili che migrano in superficie quando l'acqua nella quale sono contenuti si dissolve evaporando con conseguente asciugatura del muro.
Una volta asciugata la parete, i sali che si concentrano sulla superficie della muratura si cristallizzano.
Il passaggio alla fase solida è seguito sempre da un aumento di volume.
Pertanto se il manufatto, durante la sua vita, è soggetto a cicli di bagnatura e asciugatura (risalita capillare, aerosol marini, ecc.), l'alternanza della solubilizzazione e ricristallizzazione dei depositi salini superficiali porta allo sfaldamento di intonaci, malte, pitture ecc.
Normalmente l'efflorescenza è un fenomeno superficiale, poiché l'acqua evaporando trascina i sali disciolti verso l'esterno.
Raramente la cristallizzazione avviene in profondità determinando il distacco delle parti più superficiali della muratura (si parla di **subefflorescenza**) similmente ai fenomeni dovuti all'azione del gelo.

Origine dell'acqua

L'acqua può avere origine interna (umidità di costruzione che viene smaltita in un periodo compreso tra 6 e 24 mesi) o esterna (falda acquifera, pioggia, umidità del terreno, ecc.)

Origine dei sali

Le efflorescenze comuni derivano, per la maggior parte, dai sali solubili che sono contenuti nei materiali con cui è costituito il manufatto, quali ad esempio:

- i leganti (cemento, la calce idraulica, ecc.)
- gli inerti
- i laterizi.

In questo caso le efflorescenze sono esteticamente fastidiose ma innocue poiché temporanee perché scompaiono normalmente dalle nuove costruzioni entro il primo anno dalla loro realizzazione sotto l'azione degli agenti atmosferici.
Quando i sali provengono da fonti esterne quali il terreno (sali assorbiti per capillarità) o l'aerosol atmosferico (zone marine o inquinamento atmosferico), le efflorescenze che si formano possono avere effetti dannosi a seguito dei predetti cicli di bagnatura e asciugatura.

Rimedi

Si può ricorrere ad un lavaggio con una soluzione al 5 -10 % di acido cloridrico, seguito da abbondante risciacquatura.
L'utilizzo di acidi è assolutamente da evitare, tuttavia, nel caso di manufatti di interesse storico-artistico, poiché provoca un grave deterioramento delle rocce, sia naturali, sia artificiali. L'estrazione dei sali solubili deve pertanto essere eseguita con acqua distillata. La rimozione di efflorescenze saline non solubili in acqua può essere condotta con mezzi meccanici (bisturi, microscalpelli, etc.)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 29-03-2011

RISALITA CAPILLARE PAG. 32

Il materiale da costruzione poroso permette all'umidità di risalire attraverso la muratura, le costruzioni in calcestruzzo e andarci poi a mettere in equilibrio (acqua liquida - acqua vapore) sulla superficie del materiale.
La risalita capillare fa sì che il locale abitativo sia troppo umido.

BAGNABILITÀ → PERMEABILITÀ → RISALITA → EQUILIBRIO

A Venezia c'è grande risalita capillare.
[La risalita teorica prevede che ci sia un sistema isolato, cioè non ci sia contatto con l'atmosfera].

Esperienza in laboratorio: la risalita capillare si blocca quando è pari alla pressione idrostatica del liquido risalito.
SISTEMA ISOLATO (cioè non a contatto con l'atmosfera)
Dimensioni capillari: dimensioni per cui si può instaurare nel tubo un'interazione molto forte tra le molecole che bagnano la superficie del tubo e le molecole della superficie interna.

Il liquido tende a risalire verso l'alto del tubetto, perché l'interfaccia liquido-solido è favorita rispetto a quella liquido-gas; la risalita si blocca quando la pressione idrostatica del liquido è pari alla forza di risalita (dovuta alla tensione superficiale)

EQUILIBRIO: PRESS. IDROSTATICA = SPINTA VERSO L'ALTO

$$r_c = r_m \cos\theta$$

θ → angolo di contatto

$$P_c = \Delta P = 2\gamma \cos\theta / r_c$$

EQUILIBRIO: $2\gamma \cos\theta / r_c = \rho h g$

h → altezza; g → acc. gravità; ρ → densità

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 324

J = FLUSSO TERMICO: quantità di calore che fluisce nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie.

$$J = \frac{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)}{\Delta A}$$

Equazione di Fourier:

$$\lambda = -\frac{\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)}{A\left(\Delta T/\Delta x\right)} \qquad \frac{W}{m \cdot K}$$

[Se appoggio la mano su un metallo, "mi viene rapita" energia termica e ne viene rapita di più che nel caso del legno.]

L'energia termica all'interno del materiale viene trasferita tramite MOTO ELETTRONICO (a) e VIBRAZIONE ATOMICA (b).

(a) Gli elettroni delle zone più calde hanno maggiore en. cinetica e si muovono più velocemente, urtano gli altri e cedono en. cinetica (e quindi termica) agli altri elettroni.

(b) Gli atomi oscillano attorno alla loro posizione di legame all'aumentare della temp. e l'energia di vibrazione passa da atomi che vibrano di più nelle zone più calde a quelli che vibrano di meno nelle zone più fredde.

FONONI: pacchetti quantici accoppiati a vibrazioni atomiche (sono oscillazioni di tipo elastico)

$$\lambda = \underbrace{\lambda_r}_{\lambda_{reticolare}} + \underbrace{\lambda_e}_{\lambda_{elettronica}}$$

$\lambda_{reticolare}$ (vibrazioni di tipo atomico)

METALLI: $\underbrace{\text{elettroni liberi}}_{\text{c. ca 50 volte più efficiente del trasporto fononico}}$ + trasporto fononico

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 324

VETRI A CAMERA: tra i vetri di silice (che è già isolante, poiché è amorfo) si pone uno strato d'aria (ottimo isolante).

Poliuretano espanso – Polistirene espanso (polistirolo)

- **DILATAZIONE TERMICA LINEARE**: fenomeno per cui i materiali, se riscaldati, aumentano di volume; se raffreddati, diminuiscono di volume.

LINEARE: perché l'aumento viene misurato lungo una direzione.

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

viene data questo parametro normalizzato in modo da svincolarci dalle dimensioni specifiche del provino, per far sì che questa legge valga in generale per quel tipo di materiale.

potrà essere considerato come una deformazione elastica che il materiale subisce a seguito di un'azione esterna, non di tipo meccanico ma termico.

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon_T = \alpha \Delta T$$

$$\alpha = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T} \quad [°C^{-1}]$$

FIG. 3.18: le materie plastiche, a parità di variazioni termiche, subiscono maggiori variazioni di dimensioni rispetto a metalli e ceramici.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 324

però non bastano combustibile e comburente da soli per scaturire la fiamma, ma affinché ci sia la fiamma, oltre a combustibile e comburente, deve esserci calore (è l'energia di attivazione, è l'innesco)

Una volta innescata, la combustione è ESOTERMICA, quindi fornisce calore e pertanto garantisce il suo mantenimento e, inoltre, l'estensione ad altre zone del materiale combustibile.

COMBUSTIBILE + COMBURENTE → PRODOTTI DI COMBUSTIONE

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

ma:

$$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$$

GAS narcotici (CO, HCN (acido cianidrico), Benzene, Acetone) e irritanti (HCl)

in carenza d'aria (e quindi di ossigeno) la combustione del metano non porta più alla formazione di CO_2, ma di CO (monossido di carbonio): AVVELENAMENTO DA MONOSSIDO DI CARBONIO (il CO è nocivo per il sistema respiratorio).

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

In aria:

$$CH_4 + 2O_2 + 7{,}6N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}6N_2$$

l'azoto andrebbe semplificato a destra e sinistra, però bisogna "stare attenti", perché:

l'azoto (gas inerte) non è un vero e proprio "spettatore", perché quando aumenta la temp., partecipa abbastanza al trasferimento di calore.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 324

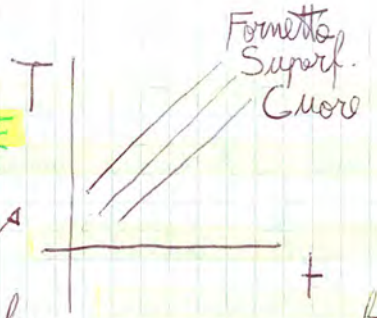
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 324

T_{forno}

$T_{int.\ campione}$

$T_{sup.\ campione}$

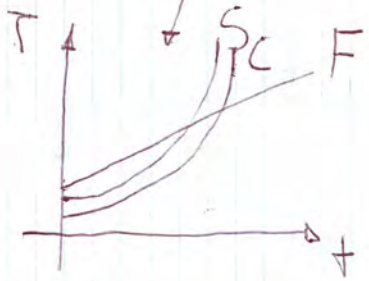
MATERIALE INCOMBUSTIBILE



Se le 3 temp. non si discostano tra di loro, ma sono molto prossime, sovrapponibili ⇒ MATERIALE INCOMBUSTIBILE ⇒ va in classe 0.
Cmq un pò di scostamento c'è sempre (dovuto alla conduzione).

Se invece i tre profili di temperatura si discostano ⇒ materiale combustibile

Fenomeno esotermico ⇒ COMBUSTIONE: il provino risulta surriscaldato rispetto al fornetto.



MATERIALE COMBUSTIBILE

⇒ c'è bisogno di altre prove per stabilire la pericolosità

a) • PROVA DI REAZIONE AL FUOCO dei materiali sospesi } durante la fase di innesco della combustione
b) • PROVA DI REAZIONE AL FUOCO ....

c) • PROVA DI REAZIONE AL FUOCO } durante la propagazione della combustione.

a) materiali che possono essere colpiti su entrambe le facce (tenda)
b) " " una singola faccia (intonaco, materiale da muratura)
c) materiali già sottoposti ad incendio in presenza di calore radiante tramite un pannello radiante

ULTERIORE PROVA
ASTM: American Standards for Testing Materials } OPACITÀ DEI FUMI
UNI: corrispettivo italiano del ASTM

riduce notevolmente la visibilità nelle zone di incendio ⇒ non si vedono le vie di fuga

verso il basso la visibilità è nettamente superiore che non verso l'alto: i fumi tendono infatti a salire.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 324

Appendice 1) Il comportamento al fuoco dei materiali

Un materiale, in vicinanza o a contatto con una fiamma, può:
- bruciare (il legno, le materie plastiche);
- può modificare la sua composizione chimica senza bruciare (i marmi, i leganti aerei ed idraulici, i cementi quando si siano preventivamente idratati);
- può modificare in modo più o meno importante le sue dimensioni (gli acciai, i laterizi).

I materiali che bruciano sono detti **combustibili**, gli altri sono denominati **incombustibili**. Non si sta a sottolineare l'importanza di conoscere il comportamento al fuoco dei materiali e, nel caso che questi siano combustibili, di conoscere le conseguenze della loro combustione. Si ricorda comunque che, per ovvie ragioni di sicurezza, specialmente per quanto attiene i locali pubblici, è importante stabilire se un materiale è incombustibile o meno e, se è combustibile, quali sono le conseguenze della sua combustione. In Italia, inoltre, gli edifici a carattere pubblico debbono essere sottoposti ad uno specifico collaudo, effettuato dai Vigili del fuoco.

Per affrontare in modo esaustivo questo argomento, iniziamo a ricordare cosa si intende per combustione.

1.1. La combustione

Si indicano con il nome di combustibili tutte le sostanze che, in opportune condizioni, sono capaci di combinarsi con un comburente. Le reazioni di combustione sono quindi processi esotermici e di ossidazione, nel corso dei quali il combustibile agisce da sostanza ossidabile ed il comburente (in genere, l'ossigeno dell'aria) da sostanza ossidante.

L'**esotermicità** della combustione fa sì che elevate siano le temperature raggiunte dalle specie reagenti in quanto i fenomeni di trasferimento del calore (conduzione, convezione ed irraggiamento) non sono in grado di disperdere così efficacemente l'elevata quantità di energia termica rilasciata.

La **conduzione termica** può avvenire per trasferimento di energia nel materiale, attraverso il moto elettronico oppure per trasferimento di fononi, tramite vibrazioni reticolari. Il trasferimento per **irraggiamento** si manifesta attraverso l'emissione, da parte del corpo caldo, di radiazioni a lunghezza d'onda caratteristica (UV, visibile, IR). Il trasferimento per **convezione** è il trasferimento di calore da parte di un fluido, in genere un gas, che, a causa del riscaldamento varia di densità e quindi migra.

Condizione necessaria alla combustione è che combustibile e comburente siano presenti nelle proporzioni corrette ed a una opportuna temperatura per divenire sorgenti di accensione (o ignizione). Per **temperatura di accensione** od **ignizione** si intende la temperatura minima alla quale si deve trovare la miscela combustibile-comburente affinché inizi la reazione di combustione.

Generalmente un preriscaldamento del combustibile è necessario all'innesco di fiamma: si formano così specie volatili che possono avere parte attiva nella combustione (come si vedrà nel caso dei materiali polimerici).

Un processo di combustione può essere schematizzato come segue:

$$\text{Combustibile} + \text{Comburente} \rightarrow \text{Prodotti di combustione}$$

Un semplice esempio di combustione è quello che coinvolge il gas metano:

$$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 324

contribuisce direttamente od indirettamente all'incendio. L'apparecchio di misura consiste di un forno elettrico con velocità di salita in temperatura programmabile, entro il quale si posiziona il campione, e di tre termocoppie, quella del forno, quella posta sulla superficie del campione, quella posta dentro il campione (Figura 1.1).

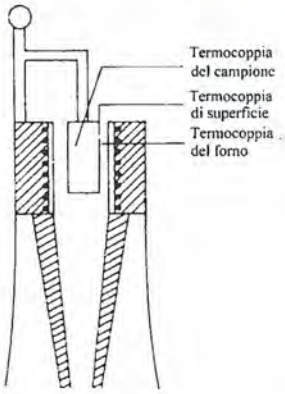


Figura 1.1. Apparecchio per la prova d'incombustibilità

Si riscalda il forno e, durante il riscaldamento, si verifica se le tre termocoppie segnalano la stessa temperatura; se ciò avviene significa che né sulla superficie del provino né al suo interno sono avvenute reazioni di combustione: il materiale è quindi giudicato incombustibile. In caso contrario, il materiale è giudicato combustibile.

Per valutare il grado di pericolosità di un materiale combustibile, in Italia sono stati normati tre metodi: la prova di reazione al fuoco (CSE RF 1/75, ora recepita dalla UNI 8456) dei materiali sospesi (i quali possono essere investiti dal fuoco su entrambe le facce) e quella dei materiali che possono essere investiti dal fuoco su una sola faccia (CSE RF 2/75, ora recepita dalla UNI 8457), nonché la prova di reazione al fuoco dei materiali sottoposti all'azione di una fiamma d'innesco in presenza di calore radiante (pannello radiante) (CSE RF 3/77, ora recepita dalla UNI 9174).

Le prime due sono prove volte alla caratterizzazione del materiale nella fase di innesco dell'incendio, la terza invece è volta a caratterizzarne il comportamento in fase di incendio in propagazione.

Il metodo CSE RF 1/75, reazione al fuoco di materiali sospesi e suscettibili di essere investiti dalla fiamma su entrambe le facce (ad esempio, i tendaggi), serve a determinare il tempo di post-combustione, il tempo di incandescenza, l'area danneggiata ed il gocciolamento di un provino del materiale, sottoposto all'azione di una piccola fiamma applicata al suo bordo inferiore. Il metodo fornisce un'indicazione sulla reazione al fuoco del materiale nella fase iniziale dell'incendio, sotto l'azione di una sorgente di ignizione di limitata intensità. Il provino è sospeso verticalmente nella camera di combustione mediante una cornice metallica a forma di U rovesciata. Essa è quindi esposta ad una fiamma definita che investe il suo bordo inferiore per 12 secondi.

Il metodo CSE RF 2/75 è la cosiddetta reazione al fuoco dei materiali che possono essere investiti da una piccola fiamma da una sola faccia (ad esempio materiali da rivestimento, a parete, soffitto, pavimento, serramenti,..) e serve anch'esso a determinare il tempo di post-combustione, il tempo di incandescenza, l'area danneggiata ed il gocciolamento di un provino del materiale, sottoposto all'azione di una piccola fiamma applicata su un'unica faccia e si riferisce come prima alla fase iniziale dell'incendio. Il provino è sospeso verticalmente nella camera di combustione entro una cornice a forma di U rovesciata. Essa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 324

Tabella 1.1 – Classificazione di alcuni materiali secondo i metodi CSE RF2 e CSE RF3

X 2 ⇒ dunque sono considerati parametri più critici rispetto a quelli X 1.

Materiali		CSE - RF/2						CSE - RF/3							
	Paramet. / Fatt. molt. del livello	Post combustione × 2	Incandescenza × 1	Zona dann. × 2	Gocciolamen. × 1	Somme ponder.	Categ.	Posiz. del prov. a parete	Veloc. di prop. × 2	Zona dann. × 2	Incandescenza × 1	Gocciolamen. × 1	Somme ponder.	Categ.	Classe
Rivestimento murale 100 PP		1	1	1	1	6	I	45°	1	1	1	1	6	I	1
Rivestimento murale vinilico		1	1	1	1	6	I	45°	1	1	1	1	6	I	1
Legno rovere		1	1	1	1	6	I	45°	3	2	3	1	14	III	3
Legno abete		1	1	1	1	6	I	45°	3	2	3	1	14	III	3
ABS		3	1	2	1	12	II	45	2	3	1	3	14	III	3
PVC		1	1	1	1	6	I	45°	1	1	1	1	6	I	1
Poliestere + fibra vetro + gelcoat normale		3	1	1	1	10	II	45°	3	2	1	1	12	II	3
Poliestere + fibra vetro + gelcoat autoestinguente		1	1	1	1	6	I	45°	3	2	1	1	12	II	2

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 324

termoindurenti (TI). I TP rammolliscono e fondono per effetto del calore, dando vita a gocciolamento; i TI tendono invece a carbonizzarsi ed a prevenire l'ignizione. Il primo stadio della combustione di un polimero è la degradazione termica che si traduce nello svolgimento di gas (in genere idrocarburi) infiammabili. La combustione di tali gas si traduce in uno sviluppo di calore in parte assorbito dal polimero. Il fenomeno tende così ad auto-sostenersi. Ovviamente è importante la natura chimica dei prodotti di degradazione. Certi gas (idrocarburi alifatici derivanti da poliolefine) bruciano con elevata esotermia. Altri gas (come quelli provenienti dalla degradazione del PVC e dei polimeri fluorurati) sono incombustibili e possono pure giocare un ruolo da inibitori della combustione della materia plastica. In Tabella 1.3 sono riportate le temperature di accensione, in presenza di una fiamma di innesco o per autocombustione, di alcuni materiali plastici. In Tabella 1.4 sono invece riportati alcuni calori di combustione.

di accensione, di innesco

Tabella 1.3
Temperature di ignizione di alcuni polimeri

Materiale	*T ignizione flash (°C)*	*T autocombustione (°C)*
Polimetilmetacrilato (PMMA)	280-300	450-460
Polietilene (PE)	340-355	350
Polistirene (PS)	345-360	485-495
Polivinilcloruro (PVC)	390	455

il fenomeno di autocombustione alle temperature ordinarie è pressoché impossibile ⇒ quando si parla di autocombustione in natura, ci deve essere sempre un innesco.

Tabella 1.4
Calori di combustione di alcuni polimeri

Materiale	*Calore di combustione (kJ/kg)*
Polietilene (PE)	46500
Polipropilene (PP)	46000
Polistirene (PS)	42000
Polivinilcloruro (PVC)	20000
Polimetilmetacrilato (PMMA)	26000

I materiali polimerici si classificano **infiammabili** (o combustibili) ed **autoestinguenti** sulla base del loro **indice limite di ossigeno**, il tasso limite di ossigeno (riferito ad una miscela azoto + ossigeno, e quindi con riferimento all'aria) al di sotto del quale la combustione non si propaga nel materiale.

*

Dal momento che il tasso di ossigeno nell'aria è del 21% in volume, cioè 0,21, i polimeri che presentano un indice limite inferiore a 0,21 sono detti combustibili od infiammabili, quelli con indice superiore a 0,21 sono detti autoestinguenti, in quanto la loro combustione non si può propagare in aria, a meno di un apporto esterno di ossigeno. L'indice limite (Tabella 1.5) dipende dalla natura chimica e dalla struttura del polimero.

infatti per prendere fiamma basta una quantità di ossigeno minore di quella presente nell'aria.

Tabella 1.5
Indici limite di ossigeno per alcuni materiali polimerici

Materiale	*Indice*	*Materiale*	*Indice*
Polietilene (PE)	0,17	Polivinilcloruro (PVC)	0,45
Polipropilene (PP)	0,17	Politetrafluoroetilene (PTFE)	0,95
Polistirene (PS)	0,18	Policarbonato (PC)	0,27
Polimetilmetacrilano (PMMA)	0,17		

* I.L.O.: definisce la quantità di ossigeno che deve essere presente insieme al combustibile affinché ci sia fiamma libera.
Il valore discriminante è 0,21 ⇒ assumo come riferimento l'aria.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 324

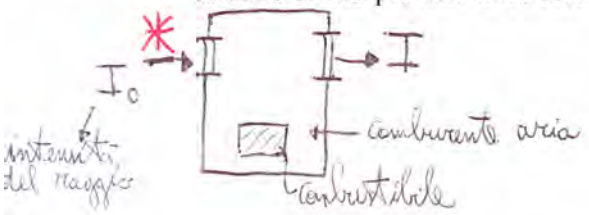
Europea, comportando conseguentemente un faticoso e costoso lavoro di certificazione presso ciascun Ente di ogni Paese di appartenenza.

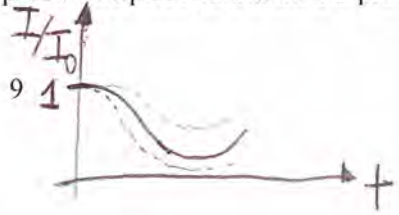
La Comunità Europea ha pertanto creato una Commissione europea per l'attuazione della direttiva dei prodotti della costruzione (Direttiva 89/106), che ha emanato recentemente due importanti decisioni che riguardano rispettivamente la resistenza al fuoco degli elementi strutturali e la classificazione della reazione al fuoco dei materiali da costruzione. Quest'ultima norma è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee 2000/147 CE e comprende una nuova classificazione (Tabella 1.6), che si basa su metodi di prova unificati, tra i quali il cosiddetto "Single burning item" (SBI), che riscuote ancora molti giudizi discordi e perplessità.

Tabella 1.6
Classi di reazione all'azione dell'incendio per materiali da costruzione ad eccezione dei pavimenti (G.U. Comunità Europee 2000/147/CE)

Classe	Metodo di prova	Criterio di classificazione	Classificazione aggiuntiva
A1	EN ISO 1182 (non combustibilità)	Aumento T ≤ 30°C Perdita di massa ≤ 50% Durata incendio = 0 (non persistente)	--
	EN ISO 1716 (potere calorifico)	Potere calorifico ≤ 2,0 MJ kg^{-1} o ≤1,4 MJ m^{-2}	--
A2	EN ISO 1182 (non combustibilità)	Aumento T ≤ 50°C Perdita di massa ≤ 50% Durata incendio = 20 secondi	--
	EN ISO 1716 (potere calorifico)	Potere calorifico ≤ 3,0 MJ kg^{-1} o ≤4,0MJ m^{-2}	--
	EN 13823 (SBI)	Tasso di incremento di incendio ≤ 120 W s^{-1} Propagazione laterale del fuoco < margine del campione Rilascio totale di calore dopo 600 s ≤ 7,5 MJ	Produzione di fumo e gocce / particelle ardenti
B	EN 13823 (SBI)	Tasso di incremento di incendio ≤ 120 W s^{-1} Propagazione laterale del fuoco < margine del campione Rilascio totale di calore dopo 600 s ≤ 7,5 MJ	Produzione di fumo e gocce / particelle ardenti
	EN ISO 11925-2 (esposizione a piccola fiamma per 30 s)	Propagazione del fuoco ≤ 150 mm entro 60 secondi	
C	EN 13823 (SBI)	Tasso di incremento di incendio ≤ 250 W s^{-1} Propagazione laterale del fuoco < margine del campione Rilascio totale di calore dopo 600 s ≤ 15 MJ	Produzione di fumo e gocce / particelle ardenti
	EN ISO 11925-2 (esposizione a piccola fiamma per 30 s)	Propagazione del fuoco ≤ 150 mm entro 60 secondi	
D	EN 13823 (SBI)	Tasso di incremento di incendio ≤ 750 W s^{-1}	Produzione di fumo e gocce / particelle ardenti
	EN ISO 11925-2 (esposizione a piccola	Propagazione del fuoco ≤ 150 mm entro 60 secondi	
E	EN ISO 11925-2 (esposizione a piccola	Propagazione del fuoco ≤ 150 mm entro 60 secondi	Gocce / particelle ardenti
F	Reazione non determinata		

Tale metodo (PR EN 13823) dovrebbe prevedere la valutazione della quantità di calore emesso dal provino, della velocità di sviluppo del calore, della quantità di fumo emessa, della velocità di rilascio e del gocciolamento. Comunque, nella normativa europea, saranno anche previste altre metodologie di prova complementari.nonché procedure diverse





© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 01-01-2011

MATERIE PLASTICHE: combustibili

- TP: rammolliscono e fondono per effetto del calore, dando vita a gocciolamento (CHAR: stato carbonioso)
- TI: tendono a carbonizzarsi ed a prevenire l'ignizione. Hanno tempi di perdita delle proprietà nettamente superiori a quelli dei TP.

Il primo stadio della combustione di un polimero è la degradazione termica che si traduce nello svolgimento di gas (in genere idrocarburi) infiammabili.

per i TP si considera un intervallo di temperatura (temperatura di rammollimento) in cui il materiale perde la sua consistenza solida e diventa poi un liquido viscoso.

METALLI: sono incombustibili, però pur essendo incombustibili si dilatano termicamente e inoltre presentano scorrimento viscoso (Creep) ad alta T; comunque non si decompongono termicamente.

CERAMICI: sono incombustibili; in molti casi si può avere decomposizione termica:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

cosa succede ad una malta in calce aerea

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 324

DEFORMAZIONE, STRAIN

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

allungamento per unità di lunghezza

L [m] $\quad \varepsilon \rightarrow$ adimensionale

il caso ed ESCL non deve tollerare imperfezioni: [Nella stragrande maggioranza dei casi, noi progettiamo affinché i materiali rispondano elasticamente agli stress esterni]

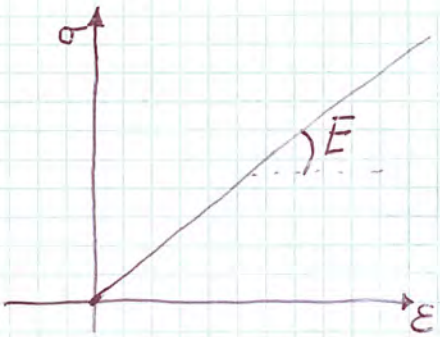
LEGGE DI HOOKE $\quad \sigma = E\,\varepsilon$

definisce la relazione tra σ ed ε solo ed esclusivamente in campo elastico, cioè riguarda la deformazione perfettamente reversibile del materiale.

E = MODULO ELASTICO, MODULO DI YOUNG $\quad [N/m^2, Pa] \rightarrow [GPa]$

La legge di Hooke viene rispettata da tutti i materiali tranne dei materiali elastomerici o gomme: hanno sì deformazioni elastiche fino a rottura, ma i valori di ε non sono direttamente proporzionali al valore di σ che li genera:

ELASTOMERI: COMPORTAMENTO ELASTICO NON LINEARE



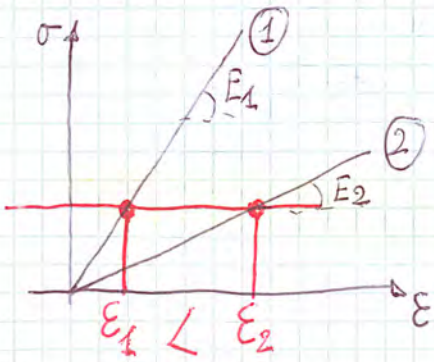
COMPORTAMENTO ELASTICO LINEARE

Ogni materiale ha una sua E; è una proprietà intrinseca del materiale: dipende da caratteristiche a livello atomico del materiale e quindi è molto difficile da modificare.

Il modulo elastico si riduce se il materiale è poroso; possiamo modificare E nelle leghe metalliche; possiamo modificare E creando compositi (matrice con basso modulo elastico; metto fibre con alto modulo elastico).

E mi descrive la RIGIDITÀ del materiale, quindi ci quantifica la reazione che il materiale è in grado di mettere in atto.

Consideriamo due materiali:



$E_1 > E_2$

a parità di stress applicato, si deforma meno il materiale con E più alto $\Rightarrow E$ quantifica la rigidità

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 324

S = rigidezza del legame ; S è una funzione dell'energia di legame : $S = f(E_0)$

a_0 = distanza di equilibrio, distanza di legame

Per il diamante è stato possibile calcolare con precisione S e a_0 e da questi due valori E (calcolato quindi su dati riferiti a livello atomico).

si è ottenuto, tramite la (1), il valore di

$E_{diamante}$ (C-C covalente puro) = 1000 GPa

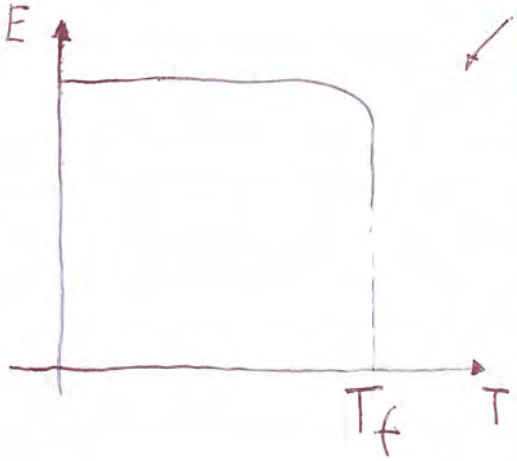
I materiali + rigidi sono quelli a legame COVALENTE ⇒ poi metallico ⇒ poi ionico ⇒ poi idrogeno ⇒ poi Van der Waals.

TAB 4.1 : RIGIDEZZA NEI LEGAMI

Per le MATERIE PLASTICHE, il modulo elastico dipende dalla temperatura ; per i materiali inorganici invece il modulo elastico si mantiene pressoché costante fino alla temperatura di degradazione fisico-chimica (temp. di fusione)

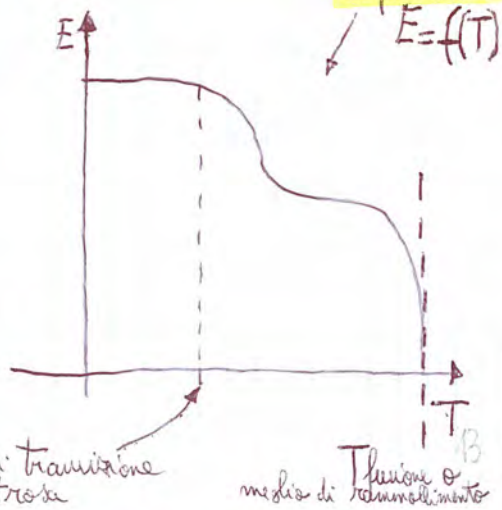
TEMPERATURA DI TRANSIZIONE VETROSA (temperatura critica per i materiali polimerici).

Se la temperatura aumenta ⇒ $E_{materiali\ polimerici}$ diminuisce



per i materiali metallici e ceramici (E rimane costante all'aumentare della T fino al valore della temp. di fusione)

per i materiali polimerici: $E = f(T)$



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 05-04-2011

SOLLECITAZIONE A COMPRESSIONE UNIASSIALE

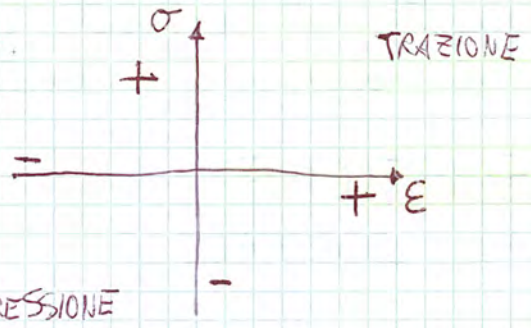
$$\sigma = -\frac{F}{A}$$

DEFORMAZIONE

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

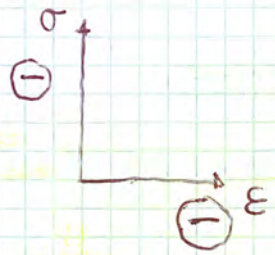
$$\Delta L = L - L_0$$ (NEGATIVO)

→ poiché abbiamo, lungo la direzione di applicazione dello stress, una diminuzione della lunghezza.



Per comodità di rappresentazione, rappresentiamo tutto sul 1° quadrante:

se si ha compressione ⟹



Una SOLLECITAZIONE COMPLESSA può essere scomposta vettorialmente in due SOLLECITAZIONI SEMPLICI:

1. sollecitazione a trazione uniassiale
2. sollecitazione di taglio (agisce parallelamente alla superficie portante)

Consideriamo ora tre sollecitazioni semplici:

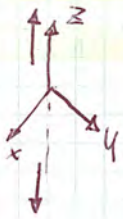
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 324

In trazione uniassiale ε è positivo ma ε_x e ε_y sono negativi.

lungo l'asse z

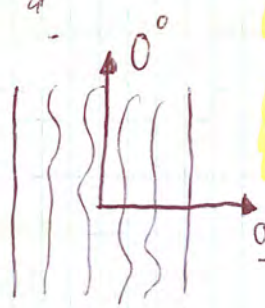
TRAZ. UNI	ε (+)	$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (−)
COMPR. UNI	ε (−)	$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (+)



MATERIALE ISOTROPO. valore della proprietà indipendente dalla direzione lungo la quale si misura.

" " ANISOTROPO: " " dipendente "

Il legno è un materiale anisotropo:



fibre

valore max. E

$E_{//} > E_{\perp}$

valore min. E

Noi consideriamo i materiali isotropi e dunque hanno trazioni trasversali ε_x e ε_y uguali.

$$\Rightarrow \nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon}$$

Il valore massimo di ν è 0,5, poi abbiamo valori che diminuiscono fino a 0,05.

Se $\nu = 0,5$ vuol dire che, se siamo in compressione, la riduzione di lunghezza lungo l'asse x è metà dell'allungamento lungo l'asse z

o y

$$\Rightarrow \varepsilon_x + \varepsilon_y = \varepsilon$$

Quindi complessivamente il materiale cambia geometria, ma non volume: $\Delta V = 0$

Se $\nu = 0,25 \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{1}{4}\varepsilon$, $\varepsilon_y = \frac{1}{4}\varepsilon \Rightarrow \varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{1}{2}\varepsilon \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta V > 0$

Quindi se $\nu = 0,5 \Rightarrow \Delta V = 0$; se $\nu = 0,25 \Rightarrow \Delta V > 0$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 324

PROVE MECCANICHE

- **STATICHE**: quando la sollecitazione viene applicata al provino in maniera gradualmente crescente fino a rottura del provino stesso
- **DINAMICHE**: quando la sollecitazione viene applicata bruscamente sotto forma di impulso di energia
- **DI FATICA**: quando la sollecitazione è applicata ciclicamente per un gran numero di volte fino a produrre, dopo un certo numero di cicli, la rottura.

NORMATIVA: EN UNI, ISO, ASTM

("American Standard for testing materials")

I materiali rispondono meccanicamente in modo non costante, ma tale modo di risposta dipende dalle modalità con cui lo stiamo stressando.

CURVE MECCANICHE: **CURVE STRESS-STRAIN** $\sigma - \varepsilon$

PROVE STATICHE

- a trat. uni.
- a compr. uni.
- a flessione
- di durezza

Tutte queste prove, tranne quella di durezza, portano alla rottura del materiale.

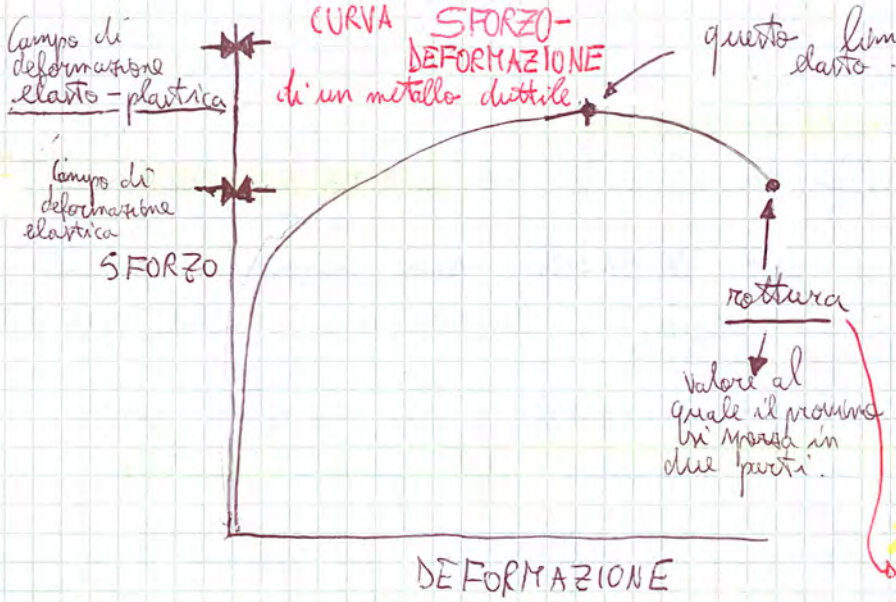
PROVINO A OSSO DI CANE: usato per la prova a trazione.

Questi provini possono essere a sezione rettangolare o circolare.
Le due estremità a sezione maggiorata servono per poterle agganciare agli afferraggi della macchina.

La prova è considerata valida solo se la rottura avviene nella parte centrale del provino, poiché se invece avviene in corrispondenza delle zone a sezione maggiorata (che sono quelle soggette a maggiori stress), la prova non ha senso.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 324



questo limite divide la deformazione elasto-plastica in due rami:

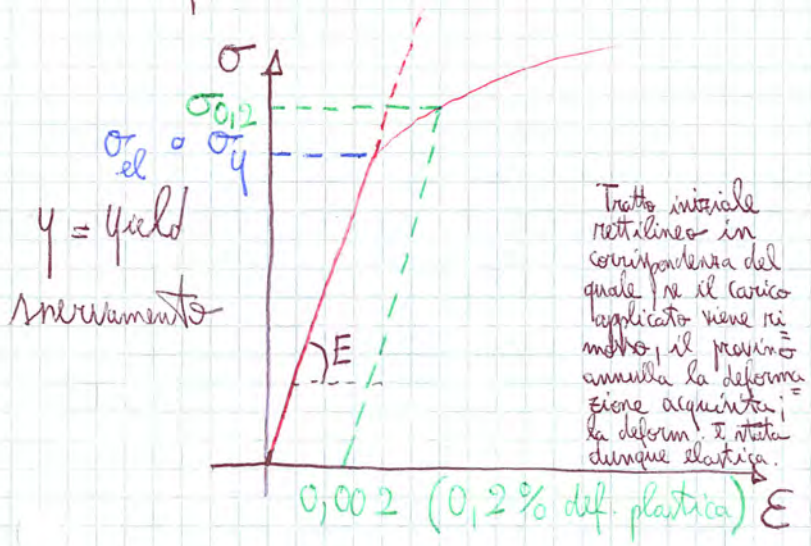
→ ramo di sinistra
1° - DEF. OMOGENEE:
le deformazioni si distribuiscono in modo uniforme lungo tutto il tratto utile del provino

→ ramo di destra
2° DEF. DISOMOGENEE O DELLA STRIZIONE:
la deformazione tenderà a localizzarsi in modo + significativo in una zona precisa: ZONA DI STRIZIONE

N.B. il valore di rottura non ha nessun senso dal punto di vista meccanico.

La deformazione elastica permane fino alla rottura.

Scomponiamo la curva in tratti:



Tratto iniziale rettilineo in corrispondenza del quale se il carico applicato viene rimosso, il provino annulla la deformazione acquisita; la deform. è stata dunque elastica.

La curva tratteggiata verde è la curva di ritorno elastico: il materiale recupera lungo questo tratto la trasformazione reversibile subita, non quella plastica (che permane nello 0,002), cioè il materiale non tornerà allo stato iniziale, ma rimarrà deformato dello 0,2%

CAMPO ELASTICO

1° parametro meccanico che possiamo ricavare da una curva σ - ε: E (che quantifica la rigidezza del materiale) → inclinazione

La velocità con cui si propagano le onde sonore nel materiale è proporzionale grossomodo a $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (ρ → densità):

$$v \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

2° parametro: σ_e LIMITE ELASTICO: sollecitazione massima che il materiale subisce reagendo solo ed esclusivamente con deformazioni elastiche.

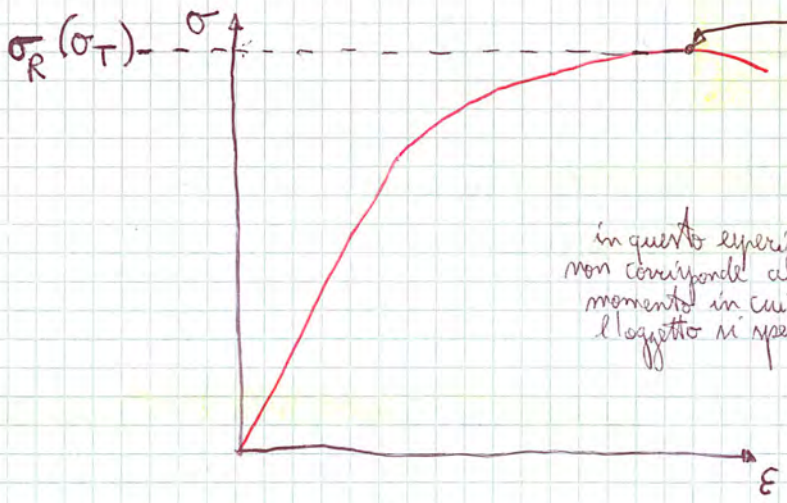
Al di là di σ_e il materiale produce anche def. plastiche ⇒ non ho più una retta.

3° parametro: σ_y LIMITE DI SNERVAMENTO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 324

Esiste anche $\sigma_{0,1}$ ⇒ 0,1 % def. plastica ⇒ $\varepsilon_{plast} = 0{,}001$



in questo esperimento non corrisponde al momento in cui l'oggetto si spezza

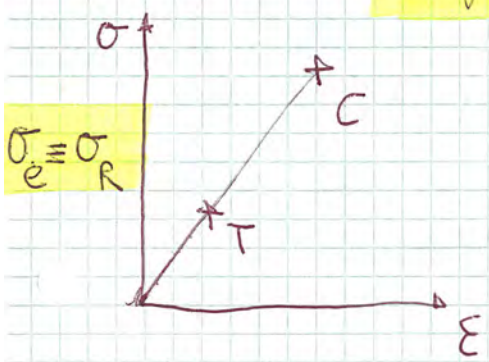
ha un importantissimo significato meccanico:

RESISTENZA A ROTTURA DEL MATERIALE (ultimo punto della curva)

(il valore di rottura non ha senso meccanico, perché noi, lavorando a vel. di def. costante separiamo i due momenti: quello in cui il materiale è già instabile meccanicamente da quello in cui avviene la rottura vera e propria; in pratica stiamo ritardando la rottura, perché stiamo controllando la velocità di deformazione; nella realtà la vel. di deformazione non è controllata).

4° PARAMETRO: σ_R (σ_R, σ_T): resistenza a rottura (a trazione)

Per un materiale fragile:



$\sigma_t \neq \sigma_c$ (σ_t: $\sigma_{trazione}$, σ_c: $\sigma_{compressione}$)

Parlare di σ_R per materiali fragili non significa nulla se non specifico se σ_R è stato ricavato a trazione o a compressione.

(2) (2^1) (3) (4) → RESISTENZA

σ_e σ_y $\sigma_{0,2}$ σ_t

campo elastico — globale

STRIZIONE, Deformazione disomogeneamente distribuita.

La curva scenderà di nuovo perché la zona sarà tende a deformarsi di più rispetto al resto del tratto utile ⇒ la macchina riduce lo stress per mantenere la velocità di deformazione costante.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 324

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2}\right]$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \left[\frac{m}{m}\right]$$

$$[\sigma \cdot \varepsilon] = \left[\frac{N \cdot m}{m^2 \cdot m}\right] = \left[\frac{J}{m^3}\right]$$

lavoro speso per unità di volume di materiale: lavoro per portare a rottura il materiale

(7) Area sottesa = Energia di rottura

⇒ TENACITÀ

MODULO ELASTICO E → RIGIDEZZA

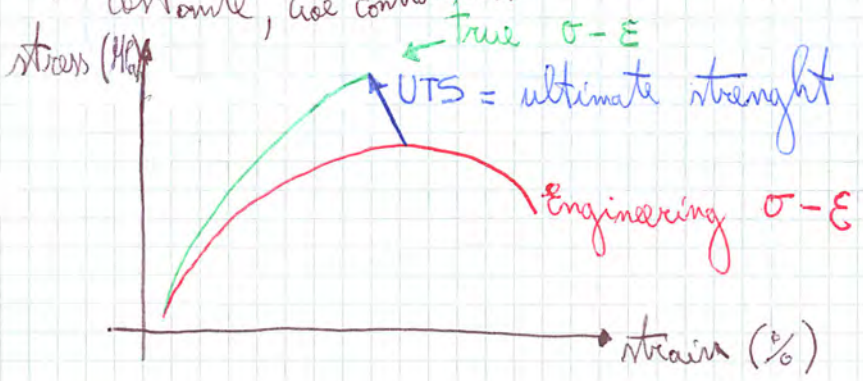
σ_{el}, σ_y, $\sigma_{0,2\%}$, σ_R → RESISTENZA

ε_R, S_R → DUTTILITÀ

Area sottesa → TENACITÀ → energia che il materiale immagazzina per pervenire a rottura

Normalmente, quanto più facciamo salire i parametri di resistenza, tanto più scenderanno i parametri di duttilità.

Le CURVE INGEGNERISTICHE si discostano dalle CURVE REALI, perché nelle 1° la velocità di deformazione non è libera, ma costante, cioè controllata.



Tutti i materiali vengono confrontati tramite CURVE INGEGNERISTICHE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 11-04-2011

Video da Virtlab sulla resistenza a trazione uniassiale di tre materiali **DUTTILI**:

1 acciaio: Fe 360

2 lega di alluminio:

3 materiale polimerico: polietilene ad alta densità o HDPE

1: provino di maggiori dimensioni (altrimenti la zona di strizione sarà troppo piccola)

3: provino di minori dimensioni (altrimenti per pervenire a rottura ci vorrà una macchina di 2 piani!!!)

ESTENSIMETRO: montato sul tratto utile e misura il ΔL (che poi diviso per L_0 mi darà ε).

PROVA ACCIAIO

Il passaggio dal campo elastico a quello elasto-plastico ha visto per questo acciaio una serie di oscillazioni: TRATTO DI SNERVAMENTO.

Sforzo max: 369 MPa; da lì in poi compare il FENOMENO DI STRIZIONE.

MASSIMO DI FORZA APPLICATA AL PROVINO corrisponde alla RESISTENZA A ROTTURA DEL MATERIALE

PROVA MATERIALE POLIMERICO

MASSIMO DI FORZA APPLICATA = 30 MPa

vedi video.

(A) Struttura iniziale casuale delle catene polimeriche: SPAGHETTI

Aumentando σ, le catene iniziano piano piano a muoversi ed a svincolarsi le une dalle altre.

Limite di movimento: σ è tale da fornire energia tale da far ruotare ed allineare le catene nella direzione di applicazione della forza.

Lo rotolamento richiede poca energia: una volta

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 324

PROVA A COMPRESSIONE UNIASSIALE (PROVA STATICA)

PAG. 48

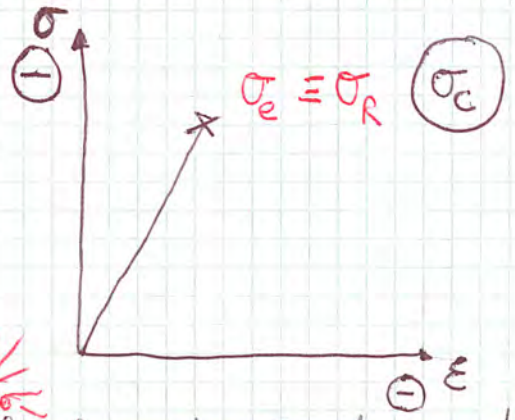
Provini di geometria cilindrica o cubica.
Nel caso dei provini cubici la normativa ci dà inform. sulla lunghezza del lato.
Nel caso dei provini cilindrici la normativa ci dà inform. precise sul RAPPORTO DI FORMA, cioè il rapporto tra il diametro del provino e la sua altezza, perché ad esempio se il diametro è troppo piccolo rispetto all'altezza (PROVINO SNELLO) ⇒ il provino tende a dare vita a FENOMENI DI INFLESSIONE.

[POLITO: grado di rugosità molto contenuto].

Anche le due facce del provino a contatto con le piastre devono essere abbastanza lisce e con un buon grado di finitura, perché la rugosità si opporrebbe alla libera deformazione.
Se le due superfici non sono adeguatamente lisce e finite ⇒ ATTRITI INTERFACCIALI ⇒ AZIONI DI TAGLIO (agiscono parallelamente alle superfici portanti del provino).

La prova a compressione è solitamente utilizzata per qualificare materiali fragili. La prova a trazione " " duttili.

COMPRESSIONE: → retta che per convenzione riportiamo nel 1° quadrante, ma sia σ che ε sono negativi.



σ è negativa perché ha verso opposto a quello della trazione; ε è chiaramente negativa.

Per un materiale fragile ⇒ limite elastico ≡ limite a rottura (fragile)

NB: Il valore di ε_R di questo materiale è 0, perché un materiale fragile subisce solo deformazioni elastiche (reversibili) ⇒ possiamo valutare solo l'energia fornita per la

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 12-04-2011

TAB 3.7. LIBRO: i materiali che non hanno scritto il valore di ε_R, sono quelli che hanno $\varepsilon_R = 0$

3° PROVA STATICA: PROVA A FLESSIONE PAG. 40

La prova a flessione viene utilizzata sia per materiali duttili che per materiali fragili.

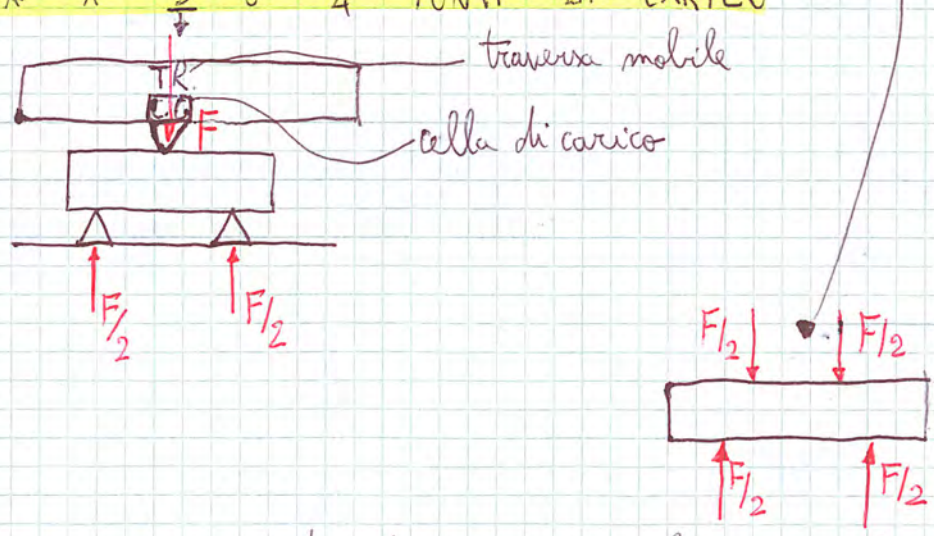
perché tale prova rappresenta una prova più severa della prova a compressione, infatti la flessione è una sollecitazione complessa che può essere scomposta in una trazione uniassiale e in una compressione uniassiale.

per la qualifica dei giunti o cordoni di saldatura (zona di giunzione)

$$\sigma_{compress.} > \sigma_{fless} > \sigma_{traz}$$

$$f = c + t$$

PROVA A 3 o 4 PUNTI DI CARICO



La prova a 4 punti di carico coinvolge un volume maggiore rispetto quella a 3 punti ⇒ la prova a 4 punti è più severa (darà risultati più bassi).

L'esperienza e la statistica ci insegnano che un materiale "soffre" di più man mano che cresce il volume di esso coinvolto dal carico.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 324

Anche in questo caso il materiale sotto prova deve essere polito, perché la rugosità inficia il risultato finale.

Le prove di durezza più usate sono 4:

HB DUREZZA BRINELL: può essere condotta con indentatori che sono sfere di acciaio o carburo di tungsteno (WC: è un ceramico (metallo / non metallo))

tipicamente utilizzate per materiali metallici e polimerici

HR DUREZZA ROCKWELL "sfere di acciaio o un indentatore conico di diamante

HV (MICRO-) DUREZZA VICKERS "piramidi di diamante a base quadrata.

si eseguono sui ceramici: micro perché le dimensioni dell'indentatore sono ridotte, questo perché i ceramici sono i materiali più duri di tutti ⇒ diminuendo le dimens. dell'indentatore, diminuirà la forza da applicare.

HK (MICRO-) DUREZZA KNOOP "piramidi di diamante a base romboedrica.

$$H \propto \frac{P}{A}$$

P = pressione, carico applicato all'indentatore

A = superficie impronta.

La prova di durezza è una prova non distruttiva (NDA); può essere usata prima del carotaggio.

Lo sclerometro è un durometro portatile dotato di un indentatore; si imposta il carico e lo si applica sull'indentatore.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 324

PROVA DI RESILIENZA o PROVA D'URTO

La **RESILIENZA** è la capacità di un materiale di resistere a sollecitazioni impulsive → carichi improvvisi, urti.
La resilienza è l'energia, per unità di superficie, assorbita da un materiale portato a rottura (energia o lavoro di rottura per unità di superficie di rottura: J/m^2).

Nella prova di resilienza applichiamo un carico improvviso di entità elevata, tale da spezzare immediatamente il provino.

Tale prova si realizza attraverso una macchina detta **PENDOLO** (pendolo di Charpy o di Izod).

provino con un piccolo intaglio per far sì che sia il sito preferenziale di propagazione.

MODO DI APERTURA 1: modo di apertura a trazione semplice.

Energia di impatto: $U = mg\Delta h = mgh - mgh'$

m → massa del pendolo

h' → il pendolo risale ad un'altezza minore di h, perché, nell'impatto con il provino, perde energia.

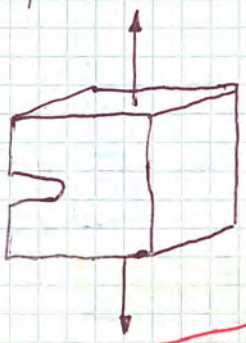
SUPERFICI DI FRATTURA

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 324

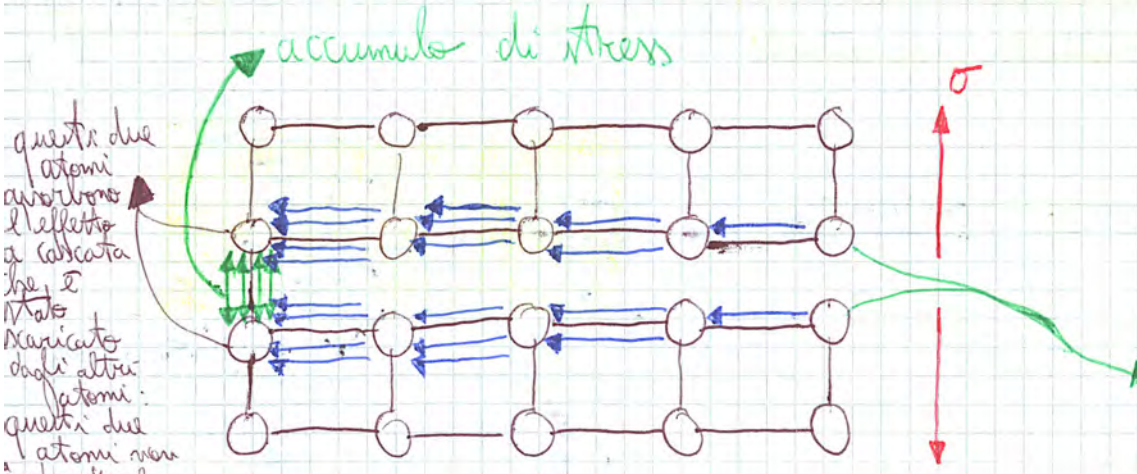
molto simile a quella teorica, misurata in base al tipo dei legami chimici.
Nel tempo poi c'è un decremento delle resistenze fino ad arrivare, asintoticamente, ai valori di resistenza del vetro in esercizio.
Questo perché compaiono sulla superficie dei difetti microscopici (dimensione micronica - millimetrica).
Il materiale, se non avesse questi micro difetti, sarebbe un materiale ideale.

Griffith iniziò a ragionare pensando ad un difetto sulla superficie del materiale, posto a trazione uniaxiale.



i difetti che "giocano" nel mondo di Griffith sono di 3-4 ordini di grandezza superiori a quelli atomici (livello microscopico) o di 6-7 ordini (livello millimetrico)

NoBo: non confondere questi difetti con quelli atomici (vacanze dislocazioni ...)!!!
sono 4-5 ordini di grandezza maggiori rispetto a quelli atomici.



$$\sigma_y = \sigma\left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}}\right)$$

a = lunghezza del difetto intaglio se superficiale; semilunghezza se interno.

r = raggio di curvatura al vertice del difetto

$$\sigma_y = \sigma(1+K)$$

K = fattore di concentrazione della sollecitazione (raccoglie parametri geometrici del difetto)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 324

che tengono unite le due superfici che si creeranno in seguito alla frattura.

MATERIALI DUTTILI: OROWAN-IRWIN

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2(\gamma+\gamma_p)E}{\pi a}}$$

γ_p = lavoro che si spende per la deformazione irreversibile (plastica) di ognuna delle due superfici di frattura.

Se mat. fragile $\Rightarrow \gamma_p = 0$

ricordare che la tenacità è l'energia necessaria per portare a rottura un materiale.

TENACITÀ (per materiali fragili) $G_c = 2\gamma$

Nei mat. fragili (no def. plastica), far crescere una cricca corta, l'energia necessaria a creare le due nuove sup. di frattura.

TENACITÀ (per mat. duttili) $G_c = 2(\gamma + \gamma_p)$

In definitiva σ_c si può esprimere così:

$$\boxed{\sigma_c = \sqrt{\frac{G_c E}{\pi a}}}$$

$$G_c = 2(\gamma + \gamma_p)$$

$\gamma_p = 0 \Leftrightarrow$ FRAGILI $\Leftrightarrow G_c = 2\gamma$

espressione unica di σ_c (sia che i materiali siano duttili o fragili).

Nei materiali duttili (si def. plastica), far crescere una cricca corta l'energia necessaria a creare le due nuove superfici di frattura e quella necessaria alla def. plastica delle due superfici.

G_c e E sono parametri propri del materiale (indipendenti dal singolo componente considerato)

a: taglia del difetto $\Rightarrow$ il difetto può variare da componente a componente (Σ o Σ)

$\Rightarrow a$ dipende dal componente

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 324

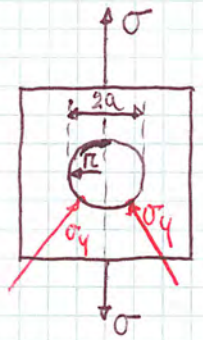
SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 18-04-2011

Riassunto lez. scorsa teoria di Griffith.

$$\sigma_{teorica} \cong \frac{E}{10}$$

Esempio di calcolo:

??? Valore di σ_y registrata al vertice di un difetto interno di raggio di curvatura (r) di $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ mm e lunghezza del difetto ($2a$) di $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ mm, per una σ a trazione applicata pari a 170 MPa.



2a: perché c'è simmetria.

$$\sigma_y = \sigma \left[1 + 2 \left(a/r \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\sigma_y = 170 \left[1 + 2 \left(1{,}25 \cdot 10^{-2} / 2{,}5 \cdot 10^{-4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_y = 2574 \text{ MPa}$$

↓

ai vertici del difetto, cioè localmente

Griffith definì anche una SOLLECITAZIONE CRITICA σ (σ_c), cioè quella tale per cui $\sigma_y = \sigma_{rottura}$

localmente → resistenza a rottura del materiale

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 324

* K_{IC} non è sinonimo di G_C, ma esse sono relazionate.

$$K_{IC} = \sqrt{G_C E} = \underbrace{\sigma\sqrt{\pi a}}_{[MPa\sqrt{m}]}$$

$\Rightarrow$ l'unità di misura di K_{IC} è questa.

La tenacità a frattura è una propr. del materiale che contiene una fessura, una cricca e che descrive la sua capacità di resistere alla sua propagazione, alla frattura.

Tanto più è alto K_{IC}, e tanto più, a parità di a (cioè a parità di difetto), crescerà σ_C che porta, ai vertici del difetto, $\sigma_y = \sigma_r$

Quindi il K_{IC} ci definisce la tolleranza che il materiale ha nei confronti dei difetti microscopici e millimetrici.

Le MATERIE PLASTICHE hanno alti moduli e sono duttili.
" RESINE TERMOINDURENTI " " bassi " " fragili.

Materiale	E	G_C	K_{IC}	
Metalli	++	+++	++++	← tenacità a rottura + alta
Ceramici	+++	--	+	← tenacità a rottura contenuta (non c'è il contributo della def. irreversibile)
TP	-	+	≈	
TI	+	--	-	

I metalli sono i materiali più "resistenti" ai difetti (bisogna salire fino ai difetti millimetrici per far sì che la resistenza ai difetti sia bassa).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 324

le temp. operative per cui si verifica il creep sono:

$T_{oper} \approx 0{,}35 \rightarrow 0{,}5\ T_f$ (in K) per i METALLI
(T_f = temp. fusione)

$T_{oper} \approx 0{,}45 \rightarrow 0{,}7\ T_f$ (in K) per i CERAMICI

Nel caso dei metalli, il CREEP è il vero problema negli incendi.

PG. 3.37 libro

Tanto più è alto lo sforzo e tanto più è alta la temp. operativa ⇒ tanto è più significativo il fenomeno di creep.

RUOLO DEL TEMPO SULLA DEFORMAZIONE SOTTO STRESS COSTANTE: VISCOELASTICITÀ PAG. 53

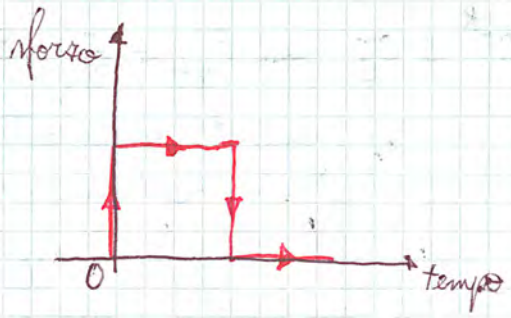


fig. 3.35 libro

Per alcune categorie di materiali (termoplastici o compositi (legno)) è possibile riscontrare, anche a T_{amb}, un'anomalia di comportamento se lo stress viene mantenuto costante nel tempo per una durata elevata.

VISCOELASTICITÀ

Alla def. elastica istantanea (legge di Hooke) si sovrappone un tratto di deformazione non costante.

Al tempo t_1 il materiale resta ancora deformato (da qui la elasticità)

La deformazione verrà recuperata, però la chiamo viscoelastica, perché

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 324

Sia nei mat. polimerici che compositi, sotto uno stress costante in un lungo tempo ci possono essere lenti movimenti reciproci nelle ~~strutture~~ del materiale

catene nei mat. polimerici

fibre nel legno

Da adesso in poi facciamo la TECNOLOGIA DEI MATERIALI

fino ad adesso abbiamo fatto la scienza dei materiali (introduzione generale)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 324

Distingueremo tra presa e indurimento solamente per motivi tecnologici: poi bisogna posare in opera il legante quando è ancora plastico (cioè non ha ancora "fatto presa").

Un legante inorganico può essere messo in opera come:

PASTA (Polvere del) Legante + H_2O

MALTA (" ") Legante + H_2O + aggregato lapideo fine (A_f) → sabbia *

CALCESTRUZZO (CLS) Legante + H_2O + aggregato lapideo fine (A_f) + + aggregato lapideo grossolano (A_g) → ghiaia

* materiale lapideo per lo più di origine silicea o calcarea
→ SiO_2 (quarziti)
→ $CaCO_3$

AGGR. FINE: SABBIA (dimensioni < 4-5 mm)
" " GROSSOLANO: GHIAIA, GHIAIONE

AGGREGATO: termine meglio di INERTE

N.B.: l'aggregato non è mai sostanzialmente inerte al legante: ① si crea una zona di interfaccia (detta ZONA DI TRANSIZIONE) che gioca un ruolo importantissimo nelle propr. meccaniche, tra il legante indurito e l'aggregato.

permette alla matrice di trasferire al rinforzo lapideo gli stress subiti in esercizio (il mat. lapideo è più resistente del legante che lo tiene unito).

② motivo per cui non chiamiamo gli aggregati con il termine di inerti: perché ci sono aggregati che reagiscono con i leganti ⇒ DEGRADO (es: degrado del cemento)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 324

dell' usato nel 1200))

Il solfato di calcio di-idrato si forma dando vita a CRISTALLI BASTONCELLARI (chiamati tecnicamente CRISTALLI ACICULARI) che si intrecciano tra loro e da questo intrecciamento derivano le proprietà meccaniche.
Cristalli di qualche micron di lunghezza.

TEMPI DI PRESA MOLTO RAPIDI: 15-60 min

REAZIONE ESPANSIVA → PASTA

il volume occupato dal prodotto di reaz. è maggiore del volume dato dalla somma dei volumi dei reagenti.

REAZIONE ESOTERMICA → forte sviluppo di calore

(Fig. 4.7 libro)

Che cosa influenza in modo significativo il tempo di presa ???
La GRANULOMETRIA della polvere
(tanto più la polvere è fine e tanto più rapidamente reagirà)
(poiché la reaz. solido - liquido dipende molto dall'estensione dell'interfaccia tra i due stati diversi).

tempo di presa → quanto rapidamente avviene la reazione e si formano i cristalli

N.B.: gli altri leganti (cemento, calce) contrarranno (quindi bisognerà aggiungere materiale lapideo che si opporrà al ritiro dovuto all'idratazione).
Nel caso del gesso, noi possiamo mettere in esercizio l'impasto sagoola - acqua senza mat. lapideo (perché espande, non contrae) ⇒ viene usato per esempio per mettere insieme i tasselli (o comunque per tutti gli scopi simili in cui non deve rimanere spazio tra varie parti).

$$\frac{A}{C} = \frac{\text{acqua}}{\text{legante}}$$

$$\frac{a}{g} = \frac{\text{acqua}}{\text{gesso}}$$

$$\frac{a}{c} = \frac{\text{acqua}}{\text{cemento}}$$

parametro molto importante nella fig. 4.7 (pag. 66)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 324

e libera H_2O in ingente quantità (ca 21% rispetto al peso di gesso) finché il gesso non si trasforma tutto in anidrite.

Talora gli intonaci a base gesso applicati per migliorare la resistenza al fuoco contengono fibre di vetro corte (spessori di fibra di vetro) (che sono intrecciati), che ne migliorano l'aderione e la coesione e quindi limitano il degrado dovuto alla fiamma

Il gesso è un DISCRETO ISOLANTE TERMICO in quanto la sua conduttività termica non è alta.

IMPIEGHI

- Sotto forma di pasta per realizzare STUCCHI e decorazioni, rappezzi, fissaggio elementi (tasselli, infissi, ...)
- Sotto forma di pasta o di malta per fare INTONACI, generalmente per interni

Dopo la stesura, l'intonaco viene rifinito tramite LISCIATURA.

BLOCCHI PREFABBRICATI e lastre di carton gesso per tramezzi.

BLOCCHI PREFABBRICATI:

- 3 blocchi coprono ca. $1 m^2$
- pieni od alveolari (ad es. canali circolari che permettono di introdurre all'interno del blocco delle linee di servizio (rete elettrica, idrica ...))
- spessore variabile tra 4 e 15 cm
- superfici planari con profili laterali sagomati per favorire l'assemblaggio (cioè l'incastro) tra i vari blocchi.

Colaggio dell'impasto in forme

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 324

LEGANTI AEREI: CALCE AEREA

PAG. 67

Noto dall'antichità, di colore bianco

Materia prima: CALCARE $CaCO_3$ (contenuto in rocce calcaree, dolomiti

che → $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ → dolomite o dolomia)

Cottura a circa 900° C: DECARBONATAZIONE del $CaCO_3$

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

↓

CALCE VIVA

↳ non può essere utilizzata come tale nel processo in opera, ma deve essere prima SPENTA

SPEGNIMENTO della calce viva:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

↓

idroxido di calcio: CALCE SPENTA (legante)

↓

base forte

Reazione fortemente esotermica ed espansiva: MOLTO PERICOLOSA (viene condotta in opportune vasche di spegnimento situate in opportuni capannoni; prima veniva fatta in cantiere).

SPEGNIMENTO:

- con quantitativo di H_2O ca. stechiometrico ⇒ CALCE IDRATA IN POLVERE (calce spenta polverulenta che prende il nome di)

  ca. = circa, perché usiamo un leggero eccesso di acqua poiché la reaz. è esotermica

- con quantitativo di H_2O in forte eccesso ⇒ GRASSELLO (prodotto pastoso ed untuoso al tatto; con-

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 324

IMPIEGHI COMUNI

- Intonaci

la calce viene catalogata come legante aereo, perché ha bisogno del contatto di CO_2 per la presa e l'indurimento

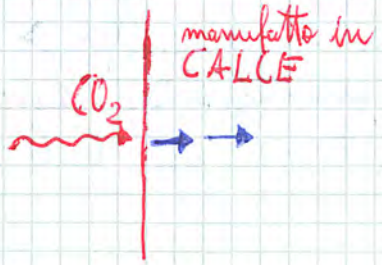
PRESA e INDURIMENTO: legante AEREO → CO_2

Reazione di CARBONATAZIONE:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Presa e indurimento LENTI → da superficie verso cuore del manufatto.

lenta e progressiva:



Il fenomeno parte dalla superficie per poi propagarsi verso l'interno del manufatto

La PROFONDITÀ DI CARBONATAZIONE dipende dal:

- tempo
- umidità del manufatto (perché se l'impasto asciuga troppo rapidamente, manca il veicolo)

l'umidità nel manufatto è essenziale

$$CO_{2\,g} \xrightarrow{H_2O} CO_{2\,aq} \; (H_2CO_3)$$

acido carbonico

{ l'acqua è il veicolo del reagente (non partecipa di per sé alla reazione)

l'anidride carbonica si scioglie in acqua e dà origine all'acido carbonico.

[⇒ INDISPENSABILE che l'impasto conservi un certo grado di umidità].

ESSICCAZIONE TROPPO RAPIDA: la malta avrà maggior difficoltà a carbonatarsi e rimarrà incoerente

BAGNARE PREVENTIVAMENTE i materiali che vanno a contatto con la malta (ad esempio i mattoni) in modo da evitare che sottraggano per assorbimento

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 324

La calce

La calce veniva ricavata bruciando in fornaci aerate (che prendono il nome di "calcare") pietre calcaree o marmo, costituite da carbonato di calcio. Questo, per effetto del calore, si trasforma in ossido di calcio o "calce viva", che, con l'aggiunta di acqua, diviene "calce idrata" detta anche "calce spenta" e, diluita per l'uso, prende il nome di "grassello". La "calce magra" (più del 10% di impurità e mescolata ad un 5% di argilla) si differenzia dalla "calce grassa" (meno del 10% di impurità) per una resa minore, ma una presa più veloce. Per murature subacquee (come ad esempio le fondazioni dei piloni dei ponti) si utilizzava la "calce idraulica", caratterizzata dalla capacità di far presa in acqua, mescolata a circa un 20% di argilla, ricavata dalla calce con un maggior grado di impurità.

Resa al grassello

Si definisce resa al grassello di una calce il rapporto fra il volume del grassello nel momento in cui, per evaporazione di una parte dell'acqua in eccesso, inizia a fessurarsi in superficie e il peso della calce viva che l'ha generato.
La resa al grassello viene espressa in metri cubi a tonnellata.

Calci grasse e magre

Una calce si dice grassa quando ha una resa al grassello $\geq 2,5$, mentre si parla di calce magra per valori inferiori a 2,5 ma superiori a 1,5.

Calce aerea

Sostanza a reazione fortemente alcalina, che reagisce chimicamente con l'anidride carbonica che è nell'aria. Allo stato anidro prende il nome di calce viva e deriva dalla cottura del calcare. Le calci aeree si suddividono in calci grasse, magre e forti in funzione della percentuale di argilla e del calcare di base (la calce grassa deriva da un calcare quasi puro contenente circa il 95% di carbonato di calcio e meno del 5% di argilla).Il processo di cottura avviene in genere molto lentamente per produrre, durante la fase di spegnimento (trasformazione della calce viva in idrato di calcio) un grassello perfettamente bianco e omogeneo (privo di granuli). La calce aerea viene generalmente impiegata per malte da intonaco o come legante per le tinteggiature di tipo tradizionale.

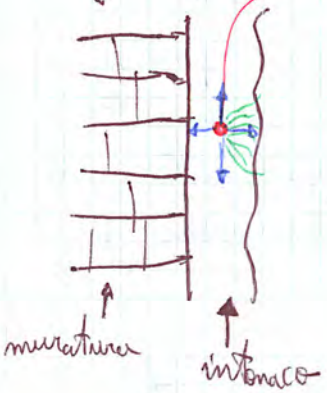
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 324

Malte da intonaco:
Se la calce non è spenta bene, i granelli di ossido di calcio residui tenderanno a spegnersi nell'intonaco in opera.
La loro idratazione produrrà un rigonfiamento, indotto da un aumento localizzato di volume.
⇒ sollevamento e rovente distacco della parte di intonaco, sovrastante il granulo, che si è idratato in ritardo.
In fondo alla cavità, o cratere rimasta si trova il granulo chiaro di calce idrata che ha prodotto il danneggiamento che prende il nome di "CALCINAROLO".

Lesione:

granellino che, spegnendosi, espande e provoca fessure



PAG. 68

CALCI IDRAULICHE: (malte di calce idraulica)

MALTE idrauliche storiche:

CALCE + POZZOLANA* oppure CALCE + COCCIOPESTO*

CALCE IDRAULICA ATTUALE:

- Polvere di cemento (Portland) "tagliata" (diluita) con sabbia fine ($\sigma_c \approx 3$ MPa) → proprietà meccaniche basse e a breve corto (⇒ lavori di finitura) → poiché c'è diluizione con sabbia.
- Polvere di cemento (Portland) "tagliata" (diluita) con calce aerea.

→ dette MALTE BASTARDE

* pozzolane: rocce di natura eruttiva, vulcaniche (pozzolane di Tivoli (vicino Roma))
→ rocce a contenuto soprattutto di silice; essendo il fenomeno eruttivo veloce, quindi il raffreddamento veloce ⇒ vitrificate amorfe.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 324

e l'altra sotto il mescolatore della pasta di gesso, che si deposita sul foglio di cartone inferiore, che presenta i bordi rialzati. Il foglio di cartone superiore chiude la forma così realizzata. L'insieme è quindi laminato tra due cilindri che impartiscono lo spessore desiderato e viene quindi avviato, tramite un nastro trasportatore, all'operazione di taglio. Gli spessori delle lastre sono compresi tra 9,5 e 25 mm circa, la larghezza varia tra 60 e 120 cm, e la loro altezza può essere di 200 o 320 cm. Il peso varia da 8 a 12 kg/m^2. Sono utilizzate per realizzare divisori, controsoffittature, rivestimenti per murature.

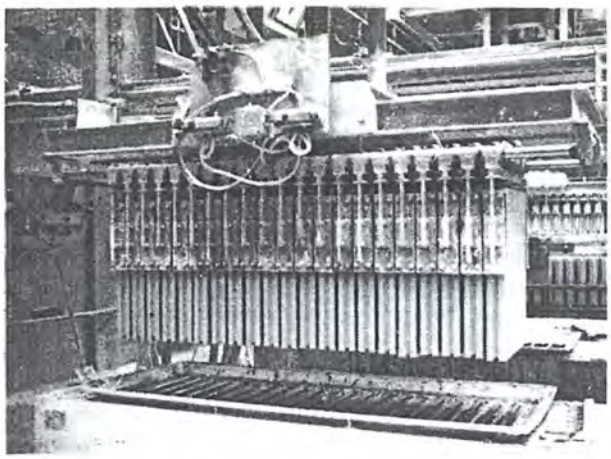


Figura 2. Sistema automatizzato per la produzione di blocchi

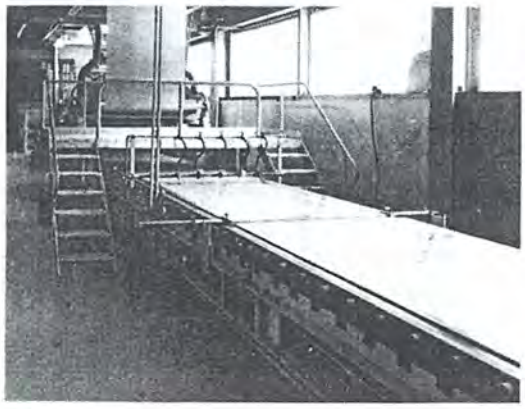


Figura 3. Impianto di produzione in continuo di lastre di carton gesso

Il gesso è un **discreto isolante termico** in quanto la sua conduttività termica è pari a 0,35 kcal/m h °C.

Inoltre, la reazione di disidratazione del gesso, indotta da un incendio:

$$CaSO_4.2H_2O \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O$$

è endotermica, cioè assorbe calore e durante il suo manifestarsi si libera acqua in quantità di circa il 21% rispetto al peso del gesso. L'insieme di questi fattori (endotermia della decomposizione, liberazione di ingenti quantità di acqua, bassa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 324

superiore al 91%, e **calce idrata da costruzione**, nella quale questo contenuto dev'essere comunque superiore all'82%.

L'azione legante della calce deriva dal fatto che la **solubilità** del carbonato di calcio è minore di quella dell'idrossido inizialmente presente, man mano che la carbonatazione procede, si assiste alla **precipitazione di cristalli** di carbonato di calcio, che si interpongono tra i granuli di sabbia e li legano.

Affinché la carbonatazione possa continuare nel tempo fino a completarsi, è indispensabile che l'impasto conservi un certo grado di umidità: se l'essiccazione è troppo rapida, la malta avrà maggior difficoltà a carbonatarsi e rimarrà incoerente. Per evitare questo inconveniente, si bagnano preventivamente i materiali che vanno a contatto con la malta (ad esempio, i mattoni) in modo da evitare che sottraggano per assorbimento l'acqua dell'impasto.

Una troppo rapida essiccazione delle malte produce la cosiddetta "bruciatura" degli intonaci messi in opera in periodi troppo caldi o in zone troppo ventilate (quindi, soggette ad una sensibile evaporazione dell'acqua d'impasto), che risultano quasi incoerenti.

Un ultimo accenno riguarda le malte da intonaco. Se la calce non è spenta bene, i granelli di ossido residui tenderanno a spegnersi nell'intonaco in opera. La loro idratazione produrrà un rigonfiamento, indotto da un aumento localizzato di volume. Questo fatto determina il sollevamento e sovente il distacco della parte di intonaco sovrastante il granulo che si è idratato in ritardo. In fondo alla cavità a cratere rimasta si trova il granulo chiaro di calce idrata, che ha prodotto il danneggiamento, che prende il nome di "calcinarolo".

Non esistono norme concernenti le prestazioni meccaniche della calce aerea. Tutti i tipi di calce aerea debbono comunque rispondere positivamente alla prova di **stabilità di volume**, che permette di valutare se la calce è stata spenta correttamente. La prova consiste nel preparare con la calce in esame una malta di buona plasticità che, distesa su una lastra di vetro, viene lasciata a far presa in un ambiente ben aerato e poi esposta per 6 ore a vapore acqueo. Non devono comparire fessurazioni, distorsioni o rigonfiamenti che sarebbero indice della presenza di ossido di calcio stracotto e non idratato. A causa della sua caratteristica di legante soltanto aereo e delle scarse resistenze meccaniche (pochi MPa), gli impieghi attuali della calce aerea sono assai limitati e prevalentemente riguardano la preparazione di **intonaci** e **basi per pitture**.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 324

Normativa EN197/1 CEM → cemento Portland e convinili

(la prof ci darà ENV ....

la V indica che: normativa già pubblicata, alla quale i paesi si adeguano, ma non ancora validata in modo definitivo ⇒ può subire ancora modificazioni)

La normativa definisce i criteri di qualificazione; CEM è il marchio di qualità che il produttore può mettere sul suo cemento solo se esso risponde ai criteri imposti dalla normativa.

- CEM I : Portland
- " " II : Portland composito
- " " III : d'altoforno (meglio dire cementi : d'altoforno)
- " " IV : pozzolanico (" " : pozzolanici o cementi di miscela)
- " " V : composito

perché vengono ottenuti mescolando al cemento Portland, delle aggiunte minerali (anche in alte quantità)

1° linea guida compositionale che caratterizza i cementi Portland

2° linea guida ....

$$\%(CaO + SiO_2) > 50\% \; ; \; CaO/SiO_2 \geq 2$$

Condizione per cui il cemento è un cemento Portland

COME SI PRODUCE UN CEMENTO PORTLAND:

1 approvvigionamento materie prime: calcare ($Ca(CO)_3$), argilla ($xAl_2O_3 \cdot y SiO_2 \cdot zH_2O$), sabbie quarzifere ($SiO_2$)

2 cottura ($T \approx 1450°C$) di miscela di calcare, argilla, sabbie quarzifere:

$(CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3)$ ⇒ farina cruda → materia prima che verrà messa nel forno di cottura.

(Fe_2O_3 → dall'argilla)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 324

I COSTITUENTI DEL CLINKER DI CEMENTO PORTLAND

SILICATI DI CALCIO (responsabili delle caratteristiche idrauliche del materiale)

- C_2S silicato bicalcico $2CaO \cdot SiO_2$
- C_3S silicato tricalcico $3CaO \cdot SiO_2$

ALLUMINATO DI CALCIO

- C_3A alluminato tricalcico $3CaO \cdot Al_2O_3$ → (ogni Al_2O_3, ci sono 3 di CaO)

FERROALLUMINATO DI CALCIO

- C_4AF ferroalluminato tetracalcico $\underbrace{4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3}$

in realtà non c'è un rapporto così preciso (4.1.1), ma a noi non interessa.

In fase di macinazione del clinker (polvere fine) → aggiunta di gesso (solfato di calcio; $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; ca. 4-8 % in peso) come **REGOLATORE DI PRESA** (ci permette di far sì che la presa non sia troppo rapida).

del cemento, quando esso viene messo in opera,

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 324

$C_2S + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + CH$ (2)

80 % 20%

→ rapporto stechiometrico 1 a 1 tra C-S-H e CH che corrisponde ad una percentuale in massa di 80% di C-S-H e 20% di CH.

[ricordare che, nella chimica del cemento, C-S-H = $CaO.SiO_2.H_2O$: tobermorite o silicato di calcio idrato].

[CH = $Ca(OH)_2$: calce idrata, idroxido di calce, PORTLANDITE].

C-S-H : responsabile delle proprietà meccaniche e dell'idraulicità.

Il C_3S si idrata più rapidamente del C_2S ⇒ sviluppa in tempi più brevi la tobermorite (che è responsabile delle proprietà meccaniche), però il C_2S sviluppa complessivamente (in tempi + lunghi) più C-S-H di C_3S:

C_3S → produce C-S-H nei primi mesi meno più di quanto ne produce C_2S.

C_2S → dopo il 1° anno, la produzione di C-S-H è dovuta maggiormente a C_2S, non a C_3S.

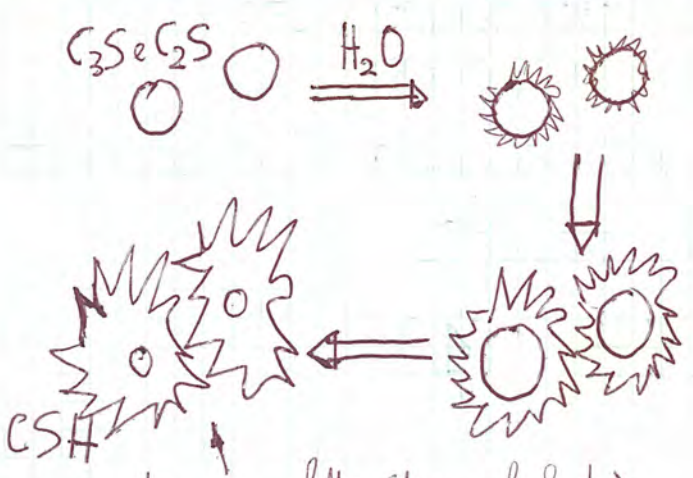
→ parole prof.

La portlandite si sviluppa attraverso cristalli tabulari di geometria esagonale. La fase tobermorite si sviluppa sottoforma di cristalli ad aghetti, forme acicolari.

→ letto dalle slide

I silicati di calcio idratandosi danno vita ad una struttura filiforme (C-S-H): cristalli acicolari che intrecciandosi, generano tenuta meccanica.

CSH → resistenza meccanica e idraulicità



devono essere aghetti (disegno sbagliato)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 324

ALLUMINATO / FERROALLUMINATO DI CALCIO

PAG. 75

$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$

$C_4AF + 6H \rightarrow C_4AFH_6$

Comportamento analogo in idratazione

[C_3AH_6 fase alluminata idrata, C_4AFH_6 fase ferroalluminata idrata].

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ (ESAIDRATO: cioè con 6 molecole di acqua nella struttura cristallina)

In presenza di CH generata da idratazione dei silicati:

$$C_3A + CH + 12H \rightarrow \underbrace{C_4AH_{13}}_{4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O}$$

Sia C_3AH_6 che C_4AH_{13} tendono a far rapprendere molto rapidamente l'impasto, quindi, se non abbiamo aggiunto gesso, nel giro di una decina di minuti l'impasto rapprende (questo a noi non va bene, perché l'impasto deve rapprendere quando viene messo in opera e non prima)

Una volta che noi abbiamo aggiunto (cioè: se noi aggiungiamo) gesso nel cemento Portland si ha:

$$C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 26H \rightarrow \underbrace{C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O}$$

TRISOLFOALLUMINATO di CALCIO IDRATO:

ETTRINGITE (primaria)

Parliamo ora del C_3A, ma è come se parlassi anche del C_4AF

(la chiamiamo primaria, perché poi ne incontreremo un'altra (secondaria))

ettringite primaria: cioè l'ettringite che si forma nella pasta di cemento fresca (fluida e deformabile), quindi nell'impasto plastico

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 324

La protezione dell'ettringite (del film di ettringite) dura il tempo necessario per fare sì che riesca a mettere in opera; poi avverrà l'espansione.

Che destino ha l'ettringite che abbiamo formato?

- può conservarsi nel manufatto (indurito) anche per tempi lunghi
- possiamo progressivamente vedere la scomparsa dell'ettringite che si decompone:

$$2\,C_4AH_{13} + \text{ettringite} + H_2O \longleftrightarrow 3\,\underbrace{C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O}_{\text{MONOSOLFOALLUMINATO}} + 2\,CH$$

(senza il coeff. stechiometrico)

(rapporto 1 a 1 tra C_3A e $CaSO_4$)

Le fasi idrate diminuiscono i tempi di presa, quindi devo contrastare ciò con aggiunta di gesso, ma

NON SI PUÒ ECCEDERE CON AGGIUNTA DI GESSO → FALSA PRESA!!!

$E \longleftrightarrow M$

E = ettringite
M = monosolfoalluminato

$C_3A \xrightarrow{\text{tempi + lunghi}} H$, $H + CH \longrightarrow C_3AH_6$, C_4AH_{13}

SO_4^{2-}

In tempi + lunghi (cioè quando il film di E si spezza) il C_3A reagisce con acqua o con acqua e portlandite e darà:

l'ettringite secondaria ("pericolosa") si formerà con aggiunta di solfati (SO_4^{2-}) (apportati dall'esterno) alle fasi idrate.

perché si crea all'interno un cls che è già indurito.

Perché dunque non aggiungo gesso in quantità tale da far sì che, da C_3A, si formi tutta ettringite e quindi monosolfoalluminato (e non C_3AH_6 o C_4AH_{13})!!!

Perché una quantità troppo grande di gesso fa sì che il gesso superi il suo prodotto di solubilità ⇒ precipitazione dei cristalli di gesso ⇒ perdita di gesso (che rappresenta in pochi minuti) ⇒ il gesso non favorisce più l'aumento del tempo di presa ⇒ **FALSA PRESA.**

la si distingue rispetto alla presa rapida degli alluminati, perché la falsa presa del gesso può essere temporaneamente eliminata

$$\begin{matrix} C_3A \\ (C_4AF) \end{matrix} \xrightarrow[\substack{+H \\ +CH}]{\text{Gesso}} \left\{ \begin{matrix} E, M \\ C_3AH_6 \\ C_4AH_{13} \end{matrix} \right. \quad \left.\begin{matrix} \\ \\ \end{matrix}\right\} \text{alluminati di calcio idrati}$$

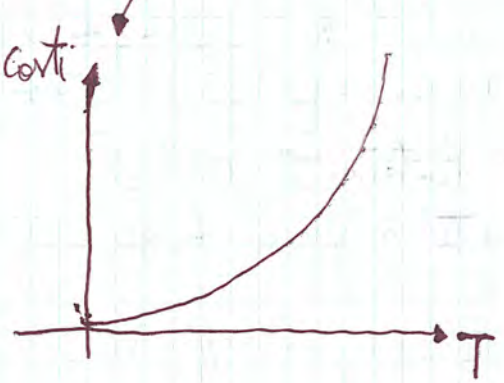
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 324

fortemente i costi → inaccettabile!!!

- Al_2O_3 e Fe_2O_3 agiscono da "FONDENTI", facendo comparire una fase liquida transitoria a temp. intorno a 1350-1450 °C (promozione delle reaz. allo stato solido (reazioni solido-solido) che portano alla formazione dei silicati di calcio) → in loro assenza aumenterebbero le temp. di processo necessarie → inaccettabile perché i costi aumenterebbero troppo!!!

pensare alla legge di Fick (aumentando la temp., aumenta la diffusività).



← andamento esponenziale della relazione che sussiste tra costi e temperature

la fase fusa (liquida) favorisce la reaz. solido-solido.
La fase fusa che si forma viene definita FASE LIQUIDA TRANSITORIA perché ovviamente solidifica all'uscita della tempra dal forno.

Ricordare che Al_2O_3 e Fe_2O_3 sono contenute nell'argilla.

LE REAZIONI D'IDRATAZIONE DEI COSTITUENTI DEL CEMENTO PORTLAND SONO ESOTERMICHE → CALORE D'IDRATAZIONE

Dopo 365 gg (in KJ/Kg):

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
≈500	≈260 *	≈865 *	≈420

CALORE DI IDRATAZIONE PER IL CEMENTO: ≈ 380-500 KJ/Kg

* il calore sviluppato è basso, perché l'idratazione è lenta
* sviluppa tanto calore e lo sviluppa la maggior parte nei primissimi gg. perché si idrata rapidamente

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 324

IL RUOLO DEI PORI CAPILLARI:

- influenzano proprietà meccaniche e durabilità

> porosità, < resistenza
> porosità, > permeabilità, < durabilità

volume dei pori capillari ← $V_p = 100\, a/c - 36{,}5\, \alpha$ (1)

a/c = rapporto acqua/cemento , α = grado di idratazione

$\downarrow V_p$ $\downarrow a/c$ $\uparrow \alpha$

parametro tecnologico che dipende da noi

parametro chimico che dipende unicamente dal tempo

α: grado di avanzamento di reazione ($\alpha = 0 \div 1$)

α in generale indica il

nel nostro caso è = 0 quando inizio a mescolare la polvere di cemento e acqua

quando tutti i costituenti del cemento si sono completamente idratati.

(1) ci dice che se voglio avere una pasta di cemento (quindi un CLS) resistente meccanicamente e durevole devo:

- mettere il quantitativo d'acqua necessario a far sì che $\alpha = 1$ (cioè a far sì che tutti i costituenti del cemento si idratino).
- mantenere il rapporto a/c il più basso possibile, compatibilmente con $\alpha = 1$

⇒ devo fissare il rapporto a/c minimo necessario per far sì che $\alpha = 1$

(minimo perché devo diminuire il volume dei pori, cioè diminuire i pori + pericolosi; diminuendo a/c, infatti, diminuisce V_p)

pori di volume più grande

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 09-05-2011

IMPERMEABILITÀ ALL'ACQUA DI UNA PASTA DI CEMENTO IDRATATA

L'impermeabilità prevede pori isolati, non interconnessi.
Si può ottenere una pasta di cemento impermeabile se regoliamo "giustamente" il rapporto a/c.

RAPPORTI a/c	TEMPO
0,4	3gg
0,45	7gg
0,5	2 settimane
0,6	6 mesi
0,7	1 anno
>0,7	mai

ACQUA E RAPPORTO a/c

Dopo IDRATAZIONE troviamo tre tipologie di acqua:

1 ACQUA CAPILLARE, nei pori, facilmente evaporabile (cioè facilmente allontanabile dal manufatto)

2 ACQUA ADSORBITA, fisicamente trattenuta sulla superficie dei prodotti idrati (dei solidi della pasta indurita). La perdita di tale acqua è responsabile del ritiro della pasta indurita per essiccamento).
↓ stabilizza le fasi idrate

3 ACQUA COMBINATA, chimicamente legata ai prodotti di idratazione, non viene persa per essiccamento e si libera solo per effetto di degradazione chimica ad alta temperatura (ad esempio, in caso di incendio).

La 1 è il veicolo che trasporta gli agenti aggressivi nel materiale attraverso i pori.

La 2, essendo legata fisicamente, è legata in modo meno forte della 3, che invece è legata chimicamente.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 10-05-2011

CEMENTI PORTLAND CEM I
- CEMENTI D'ALTO FORNO CEM III
- +
- CEMENTI POZZOLANICI CEM IV

CEMENTI DI MISCELA

CEMENTO POZZOLANICO: costituito da una miscela finemente macinata di clinker di cemento Portland, di gesso e di pozzolana (11-55% massa)
- 11-35 % in massa (CEM IV A)
- 36-55 % in massa (CEM IV B)

LOPPE → $\underbrace{CaO, SiO_2}_{\text{componenti vetrosi}}$, (MgO)

POZZOLANA → $\underbrace{SiO_2}_{\text{vetrosa}}$

Per i cementi d'a.f. dobbiamo attivare una loppa.
" " cementi pozzolanici " " pozzolana.

PAG. 11 NORMATIVA: 6.2 RESISTENZA INIZIALE:
Nel corso degli anni c'è stato un anticipo del 3° al 2° giorno per far sì che si anticipi di 24 ore il tempo affinché il produttore si accorga che la sua produzione deve essere variata o meno.
In una produzione continua come quella del cemento, 24 ore prima vuol dire un mucchio di soldi risparmiati per il produttore.

Il 32,5 viene controllato a 7gg e non a 2gg, perché a 2gg i 32,5 non hanno adeguata resistenza per fare il test: (perché è meno sensibile ad eventuali errori del processo produttivo).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 324

Consideriamo il caso delle pozzolane:

CEM IV

Pozzolana (caratterizzata in modo prevalente dalla presenza di SiO_2 AMORFA) → Clinker Portl. (89-45%)

Pozzolana + H_2O → NO!!! non ottengo nessuna reazione idraulica

Pozzolana (SiO_2) + CH (da Clinker) + H_2O → C-S-H

La portlandite in questo caso non è più un catalizzatore, ma è un reagente a tutti gli effetti (viene consumata nel corso della reazione).

altrimenti dove la prendo il C?

	CH	% aggiunta di loppa o pozzolana	PRODOTTO
CEM III	catalizzatore	↑↑↑	C-S-H SECONDARIO
CEM IV	reagente	↑	C-S-H

il C-S-H viene definito SECONDARIO

quello che garantisce propr. meccaniche e idraulicità del cemento.

perché si forma in un secondo momento: quando C_2S e C_3S hanno già cominciato a reagire

Ora si spiega la FIG. 5.9: le proprietà meccaniche sono basse a tempi brevi perché ancora non si è aggiunta la portlandite; a tempi lunghi invece, nel Portland, gli alluminati e ferroalluminati di calcio non contribuiscono allo sviluppo delle proprietà, mentre aggiungendo loppa o pozzolana, contribuisco a produrre silicati di calci

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 324

Aggiungo clinker di Portland:

Pozzolana → clinker Portland (89÷45 %)

SiO_2 (11÷55%)

Pozzolana + H_2O → niente!!

Ma

Pozzolana + CH + H_2O → C-S-H

N.B. C = CaO

↳ stavolta la portlandite è un reagente (altrimenti dove lo prendo il C??)

⇒ CH serve in quantità maggiori che nel caso delle loppe perché esso viene consumato durante la reazione.

		% LOPPA	Prodotto
CEM III	CH: catalizzatore	↑↑↑	C-S-H
CEM IV	CH: reagente	↑	C-S-H

SECONDARIO

% aggiunta

Fig. 5.9.

Nel portland ci sono pure gli alluminati

⇒ aggiungendo loppe o pozzolane metterò meno portland ⇒ meno alluminati (che non influiscono nelle proprietà meccaniche)
e + silicati (che influiscono positivamente nelle prop. meccaniche).
↳ a lungo termine

a tempi brevi le prop meccaniche sono basse perché c'è una porzione che è in attesa dell'idratazione, che si formi CH che attivi le aggiunte per dare CSH.

FIG. 5.10

⊕ Cristalli di CSH ⇒ intreccio ⊕ fitto → pori capillari più piccoli

⇒ > proprietà meccaniche

> resistenza agli agenti chimici (con di miscela ⊕ durevoli).

⊕ resistente alle aggressioni chimiche xké meno portlandite ⇒

⇒ ⊖ reagenti per la carbonatazione (CO_2 + CH ...)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 324

raffreddamento brusco (tempra) del clinker all'uscita dei forni di cottura è indispensabile al fine di conservare le fasi a comportamento idraulico.

Le **reazioni d'idratazione** dei due silicati di calcio possono essere così espresse:

$$C_3S + 3H \rightarrow CSH + 2CH$$
$$C_2S + 2H \rightarrow CSH + CH$$

Dalle precedenti reazioni emerge che, nell'idratazione dei due silicati di calcio, si forma lo stesso silicato idrato, cui sono attribuite le proprietà leganti del cemento, e l'idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$ = CH, detto anche **Portlandite**). L'idratazione del C_3S produce circa il 60% di CSH e 40% di CH, mentre quella del C_2S porta all'80% di CSH e 20% di CH.

Il gesso agisce da **regolatore di presa**. La quantità di gesso che occorre per regolare la presa del cemento è vincolata da un limite superiore imposto dalla Normativa (3,5-4% come SO_3 a seconda dei cementi, pari a circa 7-8% di gesso). Infatti un eccesso di gesso (quindi, di ettringite prodotta sui grani di C_3A in fase di idratazione) potrebbe comportare indesiderati fenomeni fessurativi a causa dell'azione espansiva che accompagna la formazione di ettringite. Tuttavia, se controllata, tale espansione compensa il ritiro conseguente all'idratazione del cemento.

Inoltre un eccesso di gesso può produrre il superamento del suo prodotto di solubilità nell'acqua d'impasto e la conseguente precipitazione di cristalli aghiformi di gesso, che contribuiscono al cosiddetto fenomeno della **falsa presa**, cioè un consolidamento momentaneo dell'impasto che può però essere contrastato con una buona agitazione.

La formazione della pellicola di ettringite (trisolfoalluminato idrato) sui grani di C_3A in fase di idratazione è accompagnata da un aumento di volume, derivante dal fatto che l'ettringite è più voluminosa rispetto ai prodotti che la generano. Buona parte del C_3A rimane al di sotto di tale pellicola di ettringite (che formandosi in fase di idratazione si chiama **primaria**, per distinguerla da quella **secondaria**, formata nel calcestruzzo indurito a seguito di attacco solfatico, come si vedrà nel seguito) e completerà la sua conversione in alluminati di calcio idrati per lenta diffusione dell'acqua attraverso la pellicola superficiale di ettringite.

L'ettringite, instabile in assenza di solfato di calcio, tende ad evolvere anch'essa lentamente, reagendo con C_3A e gli alluminati idrati, per produrre $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$, il monosolfoalluminato idrato. La conversione ettringite $\leftrightarrow$ monosolfoalluminato è una reazione reversibile.

Le reazioni d'idratazione dei costituenti del cemento Portland sono esotermiche, avvengono cioè con sviluppo di calore, il cosiddetto **calore d'idratazione** che in genere

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 324

LEZ. 09-05-2011

La condizione d'**impermeabilità** all'acqua di una pasta di cemento idratata si raggiunge in tempi tanto maggiori quanto più é elevato il rapporto acqua/cemento: ad esempio, se la pasta é confezionata con un rapporto *a/c*=0.55 essa diventa impermeabile dopo circa un mese, ma se é confezionata con un rapporto *a/c*>0,7 non risulta impermeabile neanche dopo tempi lunghissimi (Tabella 1).

Tabella 1
Tempo richiesto per avere pori capillari isolati

Rapporti a/c	Tempo
0,4	3 gg
0,45	7 gg
0,5	2 settimane
0,6	6 mesi
0,7	1 anno
> 0,7	mai

L'**acqua** può comunque esistere anche nella pasta di cemento indurita in varie forme: **l'acqua capillare** è quella presente nei pori ed è facilmente evaporabile; **l'acqua adsorbita** è fisicamente trattenuta sulla superficie dei solidi della pasta indurita (la perdita di tale acqua è responsabile del ritiro della pasta indurita per essiccamento); l'**acqua combinata** è chimicamente legata ai prodotti di idratazione e non viene quindi persa per essiccamento e si libera solo per effetto di degradazione chimica ad alta temperatura (ad esempio, in caso di incendio).

Teoricamente, sulla base della stechiometria delle reazioni d'idratazione sopra descritte, per avere l'idratazione completa, il cemento dovrebbe essere mescolato con un quantitativo d'acqua pari a circa 23% del suo peso; in realtà, per ottenere una pasta sufficientemente lavorabile, la quantità d'acqua deve essere portata al 30-35%; il fabbisogno d'acqua deve essere ulteriormente incrementato se si realizzano malte (40-45%) o calcestruzzi (fino all'80%).

(silicati e alluminati di calcio)

cioè per formare i prodotti idratati

Per 100 kg (31,75 l; densità 3,15 g/cm³)

Ai 23 litri necessari stechiometricamente per idratare 100 kg di cemento, occorre infatti addizionare la quantità d'acqua che risulta fisicamente adsorbita, e che è pari a circa il 28% del volume occupato dai prodotti di idratazione (Figura 1).

Si può stimare che 1 cm^3 di cemento, ad idratazione completata (α = 100%), richieda circa 2,14 cm^3 di spazio per alloggiare i prodotti di idratazione. Dal momento che 100 kg di cemento occupano un volume di 31,75 litri (la densità del cemento è di circa 3,15 g/cm^3), è possibile calcolare la quantità di acqua fisicamente adsorbita dal prodotto:

$$0{,}28 \times 31{,}75 \times 2{,}14 = 19 \text{ litri}$$

Pertanto il minimo quantitativo d'acqua complessivamente necessaria per idratare 100 kg di cemento è pari a:

23 litri (stechiometricamente richiesti) + 19 litri (acqua adsorbita) = 42 litri.

Pertanto il minimo quantitativo di rapporto acqua/cemento (*a/c*) è pari a 42 l /100 kg = 0,42.

Il volume iniziale della miscela, per α = 0, avendo impastato 100 kg di cemento e 42 litri d'acqua è pertanto:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 324

Le aggiunte possono essere materiali naturali, come la **pozzolana**, od artificiali come il **fumo di silice** (sottoprodotto dell'industria del silicio), ovvero la **loppa basica d'alto forno**; cementi ottenuti tramite queste aggiunte sono denominati rispettivamente cementi pozzolanici e cementi d'alto forno. L'attuale normativa prevede anche cementi la cui aggiunta é costituita sia da pozzolana che da loppa. I cementi di miscela sono raccolti nella nuova normativa nelle tipologie: CEM II (Portland composito), CEM III (d'altoforno), CEM IV (pozzolanico), CEM V (composito).

Il **cemento pozzolanico** é costituito da una miscela finemente macinata di clinker di cemento Portland, di gesso e di pozzolana.

Le pozzolane devono contenere essenzialmente silice reattiva (non meno del 25% in massa) ed allumina (Al_2O_3). Le pozzolane naturali sono rocce di origine vulcanica o sedimentaria, quelle industriali sono argille e scisti trattati ed attivati termicamente, loppe raffreddate in aria provenienti dalla lavorazione del piombo, del rame, dello zinco. In Tabella 2 sono riportate le composizioni medie di alcune pozzolane naturali (di origine italiana: Tivoli, Bacoli) ed industriali.

Tabella 2 – Composizione media di alcune pozzolane (% in peso)

Componente	Pozzolana di Tivoli	Pozzolana di Bacoli	Cenere volante	Fumo di silice
SiO_2	45-47	53-64	30-50	95-98
Al_2O_3	15-23	17-20	15-30	0,5
Fe_2O_3	6-12	4-6	6-10	-
CaO	8-9	3-4	3-6	-
MgO	1-3	1-2	2-5	-
Na_2O+K_2O	3-4	5-13	0,5-1	0,3

Dalla reazione tra la portlandite d'idratazione del cemento e la pozzolana, si formano silicati, alluminati e silicoalluminati idrati aventi composizione simile a quella dei prodotti d'idratazione del cemento Portland: il CSH formatosi per reazione pozzolanica è cronologicamente **"secondario"**, rispetto a quello primario che si produce direttamente dall'idratazione dei silicati di calcio. Esso si forma a tempi più lunghi, perché la reazione pozzolanica è più lenta del processo di idratazione dei silicati, ma anche perché la sua formazione richiede che prima si accumuli un po' di calce dalla reazione di idratazione del C_3S e del C_2S. A seguito della duplice formazione di CSH, primario e secondario, la pasta di cemento pozzolanico risulta più ricca, dopo un certo tempo di stagionatura, di materiale fibroso e quindi compatto, meno poroso, rispetto ad una pasta di solo cemento Portland idratata con lo stesso rapporto acqua/cemento (a/c). Una matrice cementizia meno porosa è anche meno permeabile e quindi più duratura. Quanto detto per la formazione di CSH secondario e per i suoi effetti benefici sulla durabilità del calcestruzzo, vale anche nel caso del cemento d'altoforno, descritto nel seguito.

L'aggiunta di pozzolana al clinker di Portland varia per Norma tra l'11 ed il 35% in massa (CEM IV/A) e tra il 36 ed il 55% (CEM IV/B), in genere in quantità tale da reagire in buona parte con l'idrossido di calcio. Anche questo effetto risulterà benefico per la durabilità delle strutture.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 324

Non è pertanto contenuto nella Norma UNI (– EN) 197 e sarà oggetto di una Normativa a sé stante. Si ottiene dalla cottura di miscele di bauxite (ossidi idrati di alluminio impuri per ossidi di ferro) e calcare, a temperature assai elevate (1500-1600°C), alle quali i componenti fondono (da cui il nome di "cemento fuso" – *ciment fondu*) e reagiscono facilmente. La massa fusa raffreddata è infine macinata finemente.

Il rapporto tra allumina e calce è prossimo ad 1 ed il costituente principale è l'alluminato monocalcico (CA), che rappresenta più del 60% in peso del cemento. Costituenti minori sono $C_{12}A_7$, C_2S, C_2AS, allumino-ferriti.

Nell'idratazione il CA forma composti differenti in relazione alle diverse condizioni di temperatura.

A bassa temperatura (fino a circa 20°C) si forma l'alluminato di calcio idrato esagonale (CAH_{10}); verso 20-25°C si forma un altro alluminato esagonale (C_2AH_8), a minor tenore in allumina, che resta pertanto libera sotto forma di gelo di idrossido di alluminio. Oltre 25°C, si forma la fase cubica (C_3AH_6) ed ovviamente aumenta il tenore di idrossido di alluminio gelatinoso. Gli idrati esagonali conferiscono ottime proprietà meccaniche al cemento alluminoso idratato, mentre la forma cubica presenta resistenze assai scadenti.

Gli impasti a base di cemento alluminoso induriscono rapidamente: dopo 24 ore, è già stato sviluppato il 70-80% delle resistenze meccaniche: Questo può consentire un rapido disarmo (anche solo dopo 6 ore dal getto). Il calore di idratazione è piuttosto elevato e si sviluppa rapidamente. Questo può portare a sensibili innalzamenti della temperatura del getto, con il rischio di formare i prodotti idrati cubici, indesiderati. Superati i 30-40°C del getto, infatti, gli idrati esagonali già formati si convertono nei cubici (conversione degli alluminati), con conseguente grave decadimento delle resistenze. Per questo motivo, il cemento alluminoso non è adatto a getti di grandi dimensioni.

Il cemento alluminoso può però resistere per lungo tempo a temperature dell'ordine degli 800°C, conservando circa il 20% delle sue resistenze iniziali: per questo è anche noto come "cemento refrattario". Inoltre, i manufatti in cemento alluminoso resistono bene all'azione delle acque aggressive e solfatiche, in quanto non contengono Portlandite e contengono invece il gelo di idrossido di alluminio che impedisce i fenomeni di diffusione all'interno della struttura.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 324

NORMA EUROPEA SPERIMENTALE
EUROPEAN PRESTANDARD
PRENORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE VORNORM

ENV 197/1

Ottobre 1992

CDU 666.94:691.54:001.4

Descrittori: cementi, composizione, definizione, proprietà, cementi portland, cementi alla loppa, cementi d'altoforno, clinker, pozzolane

Cemento
Composizione, specificazioni e criteri di conformità
Cementi comuni

Cement
Composition, specifications and conformity criteria
Common cements

Ciment
Composition, spécifications et critères de conformité
Ciments courants

Zement
Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien
Allgemein gebräuchlicher Zement

La presente norma europea sperimentale è stata adottata dal CEN il 29 aprile 1992 come norma per applicazione provvisoria. Il periodo di validità di questa norma europea sperimentale (ENV) è limitato inizialmente a 3 anni. I Paesi membri del CEN saranno invitati dopo 2 anni a sottoporre i loro commenti, in particolare per quanto riguarda la sua trasformazione da ENV a norma europea EN.
Secondo le Regole Comuni del CEN/CENELEC, i Paesi membri del CEN sono tenuti a rendere nota l'esistenza di una norma ENV e a renderla prontamente disponibile a livello nazionale in una forma appropriata. E' possibile mantenere in vigore, contemporaneamente alla ENV, altre norme nazionali contrastanti fino alla decisione finale sulla possibile conversione da ENV a EN.
I membri del CEN sono gli Organismi nazionali di normazione dei seguenti Paesi: Austria, Belgio, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Islanda, Italia, Lussemburgo, Norvegia, Paesi Bassi, Portogallo, Regno Unito, Spagna, Svezia e Svizzera.

CEN

COMITATO EUROPEO DI NORMAZIONE

European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

Segreteria Centrale: rue de Stassart, 36 - B - 1050 Bruxelles

La presente norma è in vendita presso gli Organismi nazionali di normazione.
© I diritti di riproduzione di questa norma sono riservati ai soli Organismi nazionali di normazione.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 324

NORMA EUROPEA SPERIMENTALE

ENV 197/1

Cemento
Composizione, specificazioni e criteri di conformità
Cementi comuni

SOMMARIO

0. Introduzione ..... pag. 4
1. Scopo ..... pag. 4
2. Riferimenti normativi ..... pag. 4
3. Cemento ..... pag. 5
4. Costituenti ..... pag. 6
4.1. Clinker di cemento Portland (K) ..... pag. 6
4.2. Loppe granulate d'altoforno (S) ..... pag. 6
4.3. Materiali pozzolanici (P, Q) ..... pag. 6
4.3.1. Generalità ..... pag. 6
4.3.2. Pozzolane naturali (P) ..... pag. 6
4.3.3. Pozzolane industriali (Q) ..... pag. 6
4.4. Ceneri volanti (V, W) ..... pag. 7
4.4.1. Generalità ..... pag. 7
4.4.2. Ceneri volanti silicee (V) ..... pag. 7
4.4.3. Ceneri volanti calciche (W) ..... pag. 7
4.5. Scisti calcinati (T) ..... pag. 7
4.6. Calcari (L) ..... pag. 8
4.7. Microsilici (D) ..... pag. 8
4.8. Filler (F) ..... pag. 8
4.9. Solfato di calcio ..... pag. 9
4.10. Additivi ..... pag. 9
5. Tipi di cemento, composizione e denominazione normalizzata ..... pag. 9
5.1. Tipi di cemento ..... pag. 9
5.2. Composizione ..... pag. 9
5.3. Denominazione normalizzata ..... pag. 11
6. Requisiti meccanici ..... pag. 11
6.1. Resistenza normalizzata ..... pag. 11
6.2. Resistenza iniziale ..... pag. 11
6.3. Requisiti ..... pag. 11
7. Requisiti fisici ..... pag. 12
7.1. Tempo di inizio presa ..... pag. 12
7.2. Stabilità ..... pag. 12
8. Requisiti chimici ..... pag. 12
9. Criteri di conformità ..... pag. 12
9.1. Definizioni ..... pag. 12
9.2. Introduzione ..... pag. 14
9.3. Applicazione delle procedure di conformità ..... pag. 14
9.4. Procedura generale per la verifica del - la conformità ai valori caratteristici ..... pag. 14
9.5. Procedura e criteri di conformità per la resistenza meccanica ..... pag. 15
9.6. Procedura e criteri di conformità per le proprietà fisiche e chimiche ..... pag. 16
9.7. Limiti per i difetti maggiori ..... pag. 16
Appendice A - (informativa) Piani di campionamento ..... pag. 17

Prospetti
I Tipi di cemento e composizione - Percentuali in massa ..... pag. 1'
II Requisiti meccanici e fisici ..... pag. 11
III Requisiti chimici ..... pag. 12
IV Frequenze minime di prova ..... pag. 15
V Parametri che determinano la procedura di conformità ..... pag. 15
VI Difetti maggiori ..... pag. 16
A 1. Costante di accettabilità k_A ..... pag. 17
A 2. Numero accettabile di difetti per un rischio del consumatore del 5% ..... pag. 18

(segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 324

ENV 196-4 Metodi di prova dei cementi - Determinazione quantitativa dei componenti[1)]

EN 196-5 Metodi di prova dei cementi - Prova di pozzolanicità dei cementi pozzolanici

EN 196-6 Metodi di prova dei cementi - Determinazione della finezza

EN 196-7 Metodi di prova dei cementi - Metodi di prelievo e di campionatura del cemento

EN 196-21 Metodi di prova dei cementi - Determinazione del contenuto di cloruri, anidride carbonica e alcali nel cemento

AFNOR P 18-592: 1990 Aggregati - Prova del blu di metilene

DIN 66131 Determinazione della superficie specifica di materie solide mediante adsorbimento di gas secondo il metodo Brunauer, Emmett e Teller (BET); principi fondamentali

DIN 66132 Determinazione della superficie specifica di materie solide mediante adsorbimento di azoto; metodo differenziale a punto singolo secondo Haul e Duembgen

Zement - Kalk - Gips 43 (1990), No. 8, p. 409-412 Metodo per la determinazione del tenore totale in carbonio organico (TOC) del calcare

3. Cemento

Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua.

Il cemento conforme alla presente norma europea ~~sperimentale~~, definito cemento CEM, opportunamente dosato e miscelato con aggregato ed acqua, deve essere in grado di produrre una malta o un calcestruzzo capace di conservare la lavorabilità per un periodo di tempo sufficiente per raggiungere, dopo determinati periodi, livelli di resistenza meccanica prestabiliti nonché possedere una stabilità di volume a lungo termine.

L'indurimento idraulico del cemento CEM è dovuto principalmente all'idratazione dei silicati di calcio[2)] ma anche altri composti chimici, per esempio gli alluminati, prendono parte al processo di indurimento. La somma dei contenuti percentuali di ossido di calcio (CaO)[3)] e ossido di silicio (SiO_2)[4)] reattivi nel cemento CEM deve essere almeno il 50% in massa.

I cementi CEM sono costituiti da piccoli granuli singoli di materiali differenti ma di composizione statisticamente omogenea. Un elevato grado di uniformità in tutte le proprietà del cemento sarà ottenuto mediante processi di produzione continui e, in particolare, mediante adeguati procedimenti di macinazione ed omogeneizzazione.

Per produrre i cementi di cui alla presente norma sperimentale è essenziale disporre di personale qualificato ed esperto, nonché di installazioni appropriate per provare, valutare e correggere la qualità del prodotto. Il processo di produzione del cemento ed il relativo controllo deve assicurare che la composizione dei cementi CEM sia mantenuta entro i limiti fissati nella presente norma europea sperimentale.

---

1) Questa parte ha lo status di ENV. Una EN è attualmente in fase di preparazione.

2) Esistono comunque altri cementi nei quali l'indurimento è principalmente dovuto ad altri composti, tipo alluminato di calcio in cementi ad elevato tenore di allumina (da includere nelle parti future dell'ENV 197).

3) Per ossido di calcio reattivo (CaO) si intende solo quella frazione di CaO che in condizioni normali di indurimento può formare silicati di calcio idrati o alluminati di calcio idrati. Per valutare questa frazione occorre sottrarre dal contenuto totale di CaO la frazione carbonato di calcio ($CaCO_3$) calcolata sulla base del tenore misurato di anidride carbonica (CO_2) e la frazione calcolata come solfato di calcio ($CaSO_4$) sulla base del tenore misurato di triossido di zolfo (SO_3), trascurando l'SO_3 combinato con gli alcali.

4) Per ossido di silicio reattivo (SiO_2) si intende quella frazione della SiO_2 che, dopo trattamento con acido cloridrico (HCl), risulta solubile in una soluzione bollente di idrossido di potassio (KOH). La quantità di SiO_2 reattiva si determina sottraendo dal tenore totale di SiO_2 (vedere punto 13.9 della EN 196-2) la frazione contenuta nel residuo insolubile (vedere punto 10 della EN 196-2), entrambe riferite al campione secco.

(segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 324

4.4. Ceneri volanti (V, W)

4.4.1. Generalità

La cenere volante può avere natura silico-alluminosa o silico-calcarea.
La prima ha proprietà pozzolaniche mentre la seconda può avere anche proprietà idrauliche. La perdita al fuoco delle ceneri volanti non deve essere maggiore del 5,0% in massa. Le ceneri volanti si ottengono per separazione elettrostatica o meccanica delle particelle pulverulenti provenienti dai gas di scarico dei forni alimentati a polverino di carbone. La cenere ottenuta con altri metodi non deve essere utilizzata nel cemento conforme alla presente norma europea sperimentale.

4.4.2. Ceneri volanti silicee (V)

La cenere volante silicea è una polvere fine con particelle per la maggior parte sferiche con proprietà pozzolaniche. E' composta essenzialmente da SiO_2[4] e Al_2O_3 reattivi. Il resto contiene Fe_2O_3 ed altri ossidi. La proporzione di CaO reattiva[3] non deve essere maggiore del 5,0% in massa. Il tenore in SiO_2 reattiva della cenere volante silicea conforme alla presente norma europea sperimentale non deve essere minore del 25,0% in massa.

No!!!

4.4.3. Ceneri volanti calciche (W)

La cenere volante calcica è una polvere fine con proprietà idrauliche e/o pozzolaniche. Deve contenere essenzialmente ossido di calcio reattivo (CaO)[3], silice reattiva (SiO_2)[4] e allumina (Al_2O_3). La parte rimanente contiene ossido di ferro (Fe_2O_3) e altri ossidi[5]. La proporzione di ossido di calcio reattivo (CaO)[3] non deve essere minore del 5,0% in massa. La cenere volante calcica con un tenore in ossido di calcio reattivo (CaO) compreso tra il 5,0 ed il 15,0% deve contenere non meno del 25,0% in massa di silice reattiva (SiO_2).
La cenere volante calcica finemente macinata e con un tenore in ossido di calcio (CaO) reattivo maggiore del 15,0% deve mostrare una resistenza a compressione a 28 giorni pari ad almeno 10 N/mm^2 quando sottoposta a prova secondo EN 196-1, salvo quanto indicato nelle note 6) e 7).
L'espansione della cenere volante calcica deve essere minore di 10 mm quando sottoposta a prova secondo EN 196-3 e utilizzando una miscela composta dal 30% in massa di cenere volante macinata[6] e dal 70% in massa di cemento di riferimento[8].

4.5. Scisti calcinati (T)

Lo scisto calcinato, in particolare quello bituminoso, viene prodotto in un forno speciale ad una temperatura di circa 800 °C. A causa della composizione del materiale naturale e del processo di produzione, lo scisto calcinato contiene fasi del clinker, soprattutto silicato bicalcico e alluminato monocalcico. Contiene inoltre, oltre a piccole quantità di CaO libera e di solfato di calcio[9], proporzioni più elevate di ossidi pozzolanicamente reattivi, specialmente SiO_2. Di conseguenza, uno scisto calcinato, macinato finemente, possiede, come il cemento Portland, proprietà idrauliche pronunciate nonché proprietà pozzolaniche.
Sottoposto a prova secondo EN 196-1, salvo quanto indicato nella nota[10], lo scisto calcinato, macinato finemente, deve avere una resistenza a compressione a 28 giorni pari ad almeno 25,0 N/mm^2.
Sottoposto a prova secondo EN 196-3, l'espansione dello scisto calcinato deve essere minore di 10 mm usando una miscela composta dal 30% in massa di scisto calcinato e dal 70% in massa di cemento di riferimento[8].

---

3) Vedere a pag. 5.
4) Vedere a pag. 5.
5) Se il tenore in SO_3 della cenere volante è più alto del limite superiore ammesso per il tenore in SO_3 del cemento, ciò andrà debitamente considerato nella produzione del cemento riducendo opportunamente i componenti contenenti solfato di calcio.
6) Prima della prova, la cenere volante viene macinata e la finezza, espressa come proporzione in massa di cenere trattenuta su staccio da 40 µm, deve essere compresa tra il 10 ed il 30% in massa.
7) La malta viene preparata usando solo cenere volante calcica al posto del cemento. I provini di malta vengono sformati a 48 h dalla preparazione e quindi maturati in ambiente umido con umidità relativa almeno del 90% fino al momento della prova.
8) Cemento di riferimento: una qualità selezionata di cemento Portland tipo CEM I.
9) Se il tenore in SO_3 dello scisto calcinato è più alto del limite superiore ammesso per il tenore in SO_3 del cemento, ciò va considerato in fase di produzione del cemento riducendo opportunamente i costituenti contenenti solfato di calcio.
10) La malta viene preparata usando solo scisto calcinato, macinato finemente, al posto del cemento. I provini di malta vengono sformati a h dalla preparazione e quindi maturati in ambiente umido con umidità relativa di almeno il 90% fino al momento della prova.

(segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 324

4.9. Solfato di calcio

Il solfato di calcio deve essere aggiunto in piccole quantità agli altri costituenti del cemento durante la sua produzione per controllare la presa.
Il solfato di calcio può essere gesso (solfato di calcio biidrato, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$), semiidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O$), anidrite (solfato di calcio anidro, $CaSO_4$), o una miscela di questi. Il gesso e l'anidrite sono reperibili in natura. Il solfato di calcio risulta disponibile anche come prodotto secondario di taluni processi industriali.

nei processi industriali, per limitare la produzione di SO_x (SO_2 e SO_3), tali SO_x si fanno reagire con CaO: $CaO + SO_x \rightarrow CaSO_3$ (o $CaSO_4$)

4.10. Additivi

Ai fini della presente norma europea sperimentale gli additivi sono quei costituenti, non inclusi nei punti da 4.1 a 4.9, che vengono aggiunti per migliorare la produzione o le proprietà del cemento, per esempio i coadiuvanti di macinazione. La quantità totale di questi additivi non deve superare l'1% in massa del cemento. In caso contrario, la quantità utilizzata deve essere segnalata sull'imballo e/o sul documento di consegna.
Gli additivi in questione non devono favorire la corrosione delle armature o influenzare negativamente le proprietà del cemento, del calcestruzzo o della malta confezionati con detto cemento.

5. Tipi di cemento, composizione e denominazione normalizzata

5.1. Tipi di cemento

I cementi comuni conformi alla ENV 197-1 sono suddivisi in 5 tipi principali (vedere prospetto I):

- I cemento Portland
- II cemento Portland composito
- III cemento d'altoforno
- IV cemento pozzolanico
- V cemento composito

5.2. Composizione

La composizione dei tipi di cemento deve essere conforme a quanto riportato in prospetto I.

Nota- *Per ragioni di chiarezza nelle definizioni, sono esclusi il solfato di calcio (4.9) e gli additivi (4.10). Il cemento finale va inteso come la somma dei componenti principali e secondari (nucleo) più il solfato di calcio necessario e gli additivi.*

(segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 324

LEZ. 10-05-2011

5.3. Denominazione normalizzata

I cementi europei devono essere identificati almeno attraverso il tipo (vedere prospetto I) ed un numero indicante la classe di resistenza (vedere 6.1). Se occorre indicare che il cemento possiede un'elevata resistenza iniziale si deve aggiungere la lettera R (vedere 6.2).

Esempio 1: Un cemento Portland conforme alla presente norma europea ~~sperimentale~~, classe di resistenza 42,5 ed elevata resistenza iniziale, sarà identificato come segue:

è un cemento Portland

Cemento ENV 197-1 CEM I 42,5 R

non serve più

MPa → resistenza meccanica a compressione dopo 28 giorni di stagionatura

Esempio 2: Un cemento Portland alla loppa A conforme alla presente norma europea ~~sperimentale~~, classe di resistenza 32,5 con resistenza iniziale normale, sarà identificato come segue:

Cemento ENV 197-1 CEM II/A-S 32,5

6. Requisiti meccanici

6.1. Resistenza normalizzata

La resistenza normalizzata di un cemento è la resistenza a compressione a 28 giorni determinata secondo EN 196-1.

Le classi di resistenza normalizzata considerate sono tre: classe 32,5, classe 42,5 e classe 52,5 (vedere prospetto II).

La classificazione di un cemento in base alla resistenza normalizzata deve essere indicata con i numeri 32,5, 42,5 e 52,5 secondo la denominazione normalizzata del tipo di cemento in accordo con 5.3.

6.2. Resistenza iniziale

La resistenza iniziale di un cemento è la resistenza meccanica a compressione determinata a 2 o a 7 giorni secondo EN 196-1.

Per ogni classe di resistenza normalizzata si definiscono due classi di resistenza iniziale, una con resistenza iniziale ordinaria e l'altra con elevata resistenza iniziale contrassegnata dalla lettera R (vedere prospetto II).

6.3. Requisiti

Per tutti i tipi di cemento la resistenza a compressione, determinata secondo EN 196-1, deve soddisfare i requisiti riportati nel prospetto II.

Prospetto II - Requisiti meccanici e fisici

Classe	Resistenza alla compressione N/mm²				Tempo di inizio presa	Espansione
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni		min	mm
32,5	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60	≤ 10
32,5 R	≥ 10	-				
42,5	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5		
42,5 R	≥ 20	-				
52,5	≥ 20	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30	-				

Dopo 2 gg il 32,5 R e 42,5 presentano la stessa resistenza iniziale

Attraverso la finezza di macinazione si gioca sul rapido o non rapido indurimento

Se la macinazione è più fine → è più reattiva.

segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 324

Nota- *Nel contesto della presente norma europea ~~sperimentale~~, questo termine viene utilizzato in senso più restrittivo rispetto a quanto non avvenga nel linguaggio colloquiale. Il termine è equivalente al termine "controllo" utilizzato nella maggior parte delle lingue europee.*

9.1.2. **controllo statistico della qualità:** Controllo della qualità effettuato ricorrendo a metodi statistici (come carte di controllo e piani di campionamento).

9.1.3. **autocontrollo:** Controllo statistico continuo della qualità del cemento effettuato dal produttore.

9.1.4. **lotto:** Quantità definita di cemento prodotta in condizioni presunte uniformi.

Nota - *La quantità può essere limitata rispetto al quantitativo complessivo o alla lunghezza del periodo di produzione.*

9.1.5. **consegna:** Quantità di cemento consegnata in una sola volta. Può comprendere uno o più lotti.

9.1.6. **elemento:** 1) quantità definita di cemento sulla quale si può effettuare una serie di osservazioni
2) risultato di prova

9.1.7. **prelievo elementare** (unità di campionamento): Quantità di cemento prelevata in una sola volta da una quantità maggiore di cemento.

9.1.8. **campione:** Uno o più prelievi elementari ricavati da una quantità di cemento sottoposta a controllo.

9.1.9. **campione puntuale:** Campione che consiste in un prelievo elementare ricavato da un punto di un lotto o di una linea di produzione.

9.1.10. **campione composito:** Campione composto da più prelievi elementari ricavati dallo stesso lotto, mescolati opportunamente e, se necessario, ridotto a dimensioni adeguate.

Nota - *Questo tipo di campione non può essere usato per gli scopi della presente norma europea sperimentale.*

9.1.11. **difetto:** Qualsiasi non-conformità di un elemento ai requisiti di cui ai punti 6, 7 e 8. Il difetto che causa la non-conformità può essere maggiore o minore.

9.1.12. **difetto maggiore:** Difetto che rischia di provocare mancate prestazioni o ridurre notevolmente la possibilità di impiego del cemento per gli scopi previsti.

9.1.13. **difetto minore:** Difetto che non rischia di ridurre notevolmente la possibilità di impiego del cemento gli scopi previsti.

9.1.14. **difettoso (elemento difettoso):** Elemento che presenta uno o più difetti.

9.1.15. **rischio del consumatore:** Rischio per il consumatore che una consegna sia dichiarata conforme alla norma sperimentale e perciò accettata, anche se la percentuale di difetti p è in realtà maggiore di p_0. Viene definito come quel punto sulla curva caratteristica operativa (curva OC) corrispondente ad una prestabilita bassa probabilità di accettazione (5% nella presente norma europea sperimentale).

9.1.16. **rischio del produttore:** Rischio per il produttore che una produzione sia dichiarata non conforme alla norma sperimentale e perciò rifiutata, anche se la percentuale di difetti p è in realtà minore di p_0. Viene definito come quel punto sulla curva caratteristica operativa (curva OC) corrispondente ad una prestabilita bassa probabilità di rifiuto (5% nella presente norma europea sperimentale).

9.1.17. **probabilità di accettazione:** Probabilità che un lotto contenente una determinata percentuale di difetti sia accettato in base ad un piano di campionamento prestabilito.

9.1.18 **probabilità di rifiuto:** Probabilità che un lotto contenente una determinata percentuale di difetti sia rifiutato in base ad un piano di campionamento prestabilito.

(segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 324

Prospetto IV - Frequenze minime di prova

Proprietà	Numero di campioni
Resistenza meccanica Tenore in solfati Tempo di presa iniziale Stabilità	2 volte/settimana
Tenore in cloruri Perdita al fuoco Residuo insolubile Pozzolanicità	1 volta/mese

9.4.3. Un valore di prova che non è conforme ai valori relativi dei prospetti II e III viene definito come "difetto". La norma europea sperimentale distingue tra difetti minori e maggiori. Limiti distinti sono specificati per i difetti maggiori (vedere 9.7).

9.5. Procedura e criteri di conformità per la resistenza meccanica

9.5.1. I requisiti di resistenza meccanica del punto 6 comprendono:

resistenza a 28 giorni	limite inferiore (L) e limite superiore (U)
resistenza a 2 (o 7) giorni	limite inferiore (L)

9.5.2. Nel caso dei requisiti di resistenza, la procedura di conformità deve fondarsi sul controllo mediante variabili. In linea di principio, la percentuale globale di difetti del lotto dal quale sono stati prelevati i campioni viene stimata in base ai risultati di prova. La conformità richiede che la stima non sia maggiore della percentuale accettabile di difetti.

Nota- *Per calcoli pratici di valutazione della conformità, invece di ricorrere alla percentuale di difetti, viene utilizzata la cosiddetta costante di accettabilità k_A (vedere prospetto A 1 dell'appendice A).*

9.5.3. Il piano di campionamento (ivi compreso il numero di singoli campioni puntuali da prelevare) viene stabilito mediante due parametri:

- percentuale globale accettabile di difetti
- rischio accettabile del consumatore

che sono riportati nel prospetto V. I due parametri sono utilizzati congiuntamente per la scelta dei piani di campionamento destinati all'autocontrollo continuo.
Alcuni piani di campionamento appropriati per il controllo mediante variabili sono raccolti nell'appendice della presente norma europea sperimentale.
Tutti gli altri piani che soddisfano i valori del prospetto V sono, in linea di principio, accettabili ai fini della procedura di conformità.

Prospetto V - Parametri che determinano la procedura di conformità

	Resistenza a 2 (o 7) e 28 giorni limite inferiore L	Resistenza a 28 giorni limite superiore U	Proprietà fisiche chimiche tutti i limiti
Procedura per controllo continuo	per variabili	per variabili	per attributi (ammessa per variabili)
Percentuale di difetti	5%	10%	10%
Rischio del consumatore	5%	5%	5%

Nota - *I piani di campionamento per un controllo di accettazione alla consegna di un lotto di cemento, già recante la denominazione "cemento CEM", andranno scelti, conformemente al punto 9.3.2, sulla base del rischio del produttore piuttosto che su quello del consumatore (per le definizioni, vedere 9.1.15 e 9.1.16).*

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 324

APPENDICE A
(informativa)

Piani di campionamento

A 0. Introduzione

La presente appendice descrive una serie di piani di campionamento per le due alternative di seguito citate che soddisfano le condizioni di cui al prospetto V. Le alternative sono:

- controllo continuo per variabili
- controllo continuo per attributi

Il numero di campioni e la frequenza di prova sono riportati in 9.4.2.

A 1. Controllo per variabili

In questo caso vengono calcolati il valore medio, $\bar{x}$, e lo scarto tipo, s, della serie completa dei risultati di prova (un risultato per campione).

I criteri di conformità sono:

$$\bar{x} - k_A s \geq L$$

e

$$\bar{x} + k_A s \leq U$$

dove: k_A è la costante di accettabilità;
L è il limite inferiore specificato;
U è il limite superiore specificato.

La costante di accettabilità k_A dipende dai parametri riportati nel prospetto V e dal numero, n, di risultati di prova. I valori di k_A sono elencati nel prospetto A 1.

Prospetto A 1 - Costante di accettabilità k_A

n	$P_a = 5\%$	$P_a = 10\%$
da 40 a 49	2,13	1,70
da 50 a 59	2,07	1,65
da 60 a 79	2,02	1,61
da 80 a 99	1,97	1,56
da 100 a 149	1,93	1,53
da 150 a 199	1,87	1,48
≥ 200	1,84	1,45

A 2. Controllo per attributi

In questo caso viene conteggiato il numero c_D di risultati difettosi di prova (un risultato per ciascun campione) sulla serie completa di campioni.
La conformità viene controllata ricorrendo all'equazione:

$$c_D \leq c_A$$

dove il numero accettabile di difetti c_A dipende dai parametri specificati nel prospetto V e dal numero, n, di risultati di prova. I valori di c_A sono elencati nel prospetto A 2.

(segue)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 324

Commenti a Normativa

Copertina

UNI/EN 197/1: Ente normativo nazionale/Ente normativo europeo/ N° d'ordine della norma
Data di validità con pubblicazione su G.U.
In basso esempi di "etichette" di commercializzazione di cementi con marchio CE (conformità a normativa europea).

Pagina 1

Il testo fornito in fotocopia non è quello definitivo (anche se molto prossimo al definitivo): testo pubblicato per sperimentazione in vista della validazione finale.
ENV: la "V" indica che la norma è testo provvisorio
EN: testo definitivo.

CEN: Comitato di Normazione che raccoglie rappresentanti degli Enti di Normazione nazionali degli Stati membri.

Pagina 2

Primo capoverso: La Norma ha richiesto decine di anni per arrivare al testo definitivo approvato.
Secondo capoverso: La Norma ha ricoperto il compito di fare ordine su una vasta gamma di tipologie differenti di cementi (20+50 !!) normati a livello nazionale nei vari Paesi membri.
Scelta di comprendere nella Norma solo i cementi Portland e loro derivati, escludendo altri cementi (cenno ai cementi alluminosi, *ciment fondu*, che continuano a essere regolati da Norme nazionali).

cementi molto refrattari (mantengono resistenza anche alle alte Temp.)

Alla fine della pagina : la norma fa riferimento ad altre normative (cita ad esempio la Normativa EN 196, per i Metodi di prova dei cementi, nelle sue varie parti).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 324

Terzo capoverso: Viene ribadito il ruolo essenziale per l'indurimento idraulico dei silicati di calcio (C_3S e C_2S). Compare il primo VINCOLO COMPOSIZIONALE : ($CaO+SiO_2$ almeno 50% in massa)
Quarto capoverso: un accenno al processo produttivo e al ruolo della macinazione nel garantire omogeneità e finezza.

Pagina 6

4. Costituenti
4.1. Clinker di cemento Portland
Altro limite composizionale: almeno 2/3 in massa dei silicati C_3S e C_2S.
Presenza di Al_2O_3, Fe_2O_3 e altri ossidi.
Rapporto in massa CaO/SiO_2 non dev'essere minore di 2. → la stechiometria del silicato di calcio bicalcico ci fa capire il perché

CEMENTI D'ALTOFORNO : cementi derivati dal cemento Portland (CEM III)

4.2. Loppa granulata di altoforno
Una delle tipologie di cementi normati, il **cemento d'alto forno**, si ottiene macinando clinker di Portland con gesso e con il 36-95% in peso di loppa granulata d'alto forno. (è molto più economico sostituire il clinker con la loppa, poiché la loppa è uno scarto di produzione)
La loppa granulata d'alto forno è un materiale idraulico latente, cioè un materiale che presenta proprietà idrauliche se attivato opportunamente; è un sottoprodotto* dell'industria metallurgica che si ottiene liquido alla base degli altiforni e che viene raffreddato rapidamente (la N. Tempra) al fine di conservare la struttura vetrosa. (amorfa)
Deve contenere, per Norma, almeno due terzi in massa di materiale vetroso e dev'essere costituita da almeno due terzi in massa della somma di CaO, MgO e SiO_2.
Il rapporto in massa $(MgO+CaO)/SiO_2$ dev'essere maggiore di uno.
Una composizione media di loppa basica d'altoforno è la seguente:

fusa (scoria) che galleggia sulla ghisa perché è meno densa della ghisa

perché se è cristallino, non reagirà più

* perché l'obiettivo della produzione è la ghisa e non questo, che invece è uno scarto.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 199 di 324

FUMO DI SILICE (silica fume) o MICROSILICE: è un sottoprodotto dell'industria di produzione al forno elettrico del silicio metallico o delle leghe ferro-silicio.

Pagina 7

Le ceneri volanti sono sottoprodotti delle centrali termoelettriche (alimentate a carbone) e che possono (in funzione della composizione) avere comportamento pozzolanico oppure più vicino a quello delle loppe d'alto forno (idraulico latente).

Si ponga attenzione alla definizione dei: **4.8 Fillers**.

Pagina 9

4.9. Solfato di calcio

Riconoscimento del solfato di calcio (nelle varie forme) come regolatore di presa. Azione di controllo sulla velocità di idratazione degli alluminati /ferroalluminati con formazione di ettringite primaria.

5. 1. Tipi di cemento

I 5 tipi di cemento come definiti dalla Normativa: Prospetto di **pagina 10**.

inserirli a memoria

Tipi di cemento per Norma, composizioni, loro sigle.

Si noti che ci sono dei sottotipi: ad esempio, i tipi III e IV sono suddivisi in 3 e 2 sottotipi, rispettivamente, in base alla composizione.
Attenzione ai limiti composizionali. Verranno discussi nel seguito.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 199 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 201 di 324

ci dà tutte le informazioni sui subbetti da utilizzare (poi) in fase di validazione.

Malta "plastica": definita da Normativa EN 196-1

Sono definiti:

sabbia di riferimento

- sabbia da usare (natura e granulometria),
- rapporto sabbia/cemento (3:1),
- rapporto acqua/cemento (= 0,5), non si deve, infatti, eccedere in acqua
- modalità di miscelazione,
- modalità riempimento stampi,
- modalità di compattazione e conservazione in camera climatica….

Un tempo le prove venivano condotte dopo le seguenti scadenze di stagionatura: a 3, 7 e 28 gg.

Ora:

- a 2 gg : valutazione più precisa e tempestiva. E' il primo controllo di conformità per poter intervenire tempestivamente a correggere la produzione (eccezion fatta per una sola classe, la meno prestazionale, per la quale la scadenza è prolungata a 7 gg); 32,5
- poi a 28 gg. — la scadenza a 28 gg è comune per tutti.

Concetto di resistenza iniziale:

- cemento ad indurimento normale
- cemento ad indurimento rapido (R)

Un tempo:

325 – 425 – 525 kg/cm^2

ma:

1 kg/cm^2 = 0,0981 N/mm^2 = 0,0981 MPa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 201 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 203 di 324

Un tempo,

Tempo di inizio presa

Unica sostanziale diversità, dal testo approvato (EN), del testo provvisorio (ENV) fornito in fotocopia.

Classe di resistenza	Tempo di inizio presa (min)
32,5	≥ 75
32,5 R	
42,5	≥ 60
42,5 R	
52,5	≥ 45
52,5 R	

tecnologico
parametro correlato all'operatività di cantiere.

Il tempo di inizio presa ci definisce il tempo a disposizione per la miscelazione, trasporto, messa in opera, costipamento del cemento (tutte le operazioni dalla centrale alla messa in opera)

Un tempo si valutava tempo di inizio e fine presa.

L'inizio presa importante tecnologicamente per definire tempistiche di messa in opera del conglomerato cementizio.

Tempo di fine presa ha perso significato con anticipo proprietà meccaniche alla scadenza di 2 gg. Inoltre, controllo più efficiente della finezza di macinazione, anch'essa direttamente correlabile allo sviluppo delle resistenze meccaniche a brevi stagionature.

2gg

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 203 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 205 di 324

Faccio ruotare il tronco di cono e faccio penetrare l'ago, a intervalli regolari, con che la penetrazione avviene in zone sempre diverse; quando la penetrazione si ferma a 4 mm, leggo il tempo intercorso dal momento dell'impasto e questo tempo lo definisco tempo di inizio presa.

normale di cemento, sotto il carico di 300 g, la penetra arrestandosi a 4 mm dal fondo.

Un tempo il tempo di fine presa (ora non più normato) era definito come: il tempo intercorso dall'impasto per il quale l'ago di Vicat, portato a contatto della superficie della pasta normale di cemento, sotto il carico di 300 g, lo penetrava di appena 0,5 mm dalla superficie.

Stabilità (espansione, mm): per controllo di presenza non eccessiva di CaO non reagito, non legato (CALCE LIBERA), oltre che di MgO libera.
se parte di CaO non è reagito, vuol dire che non si sono formati i silicati di calcio
A contatto con acqua: spegnimento e fenomeno fortemente espansivo.
il CaO non reagito "sulisce":

Pagina 12

Prospetto 30 Requisiti chimici

Perdita al fuoco

(o comportamento in fase di incendio)

N.B. Non ha nulla a che fare con "comportamento al fuoco" del cemento e cls. E' una prova su polvere di cemento prima di idratazione e suo ruolo è di evidenziare/evitare frodi commerciali.

Si valuta la perdita di massa percentuale (- Δm %) per cottura in forno della polvere di cemento a 950°C.
così come esce dalla produzione
La perdita di massa (perdita al fuoco) dev'essere ≤ 5% in massa.

Serve a metter in evidenza:

a) diluizione della polvere di cemento con calcare o argilla (frode);
costo elevato — costo quasi nullo

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 205 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 207 di 324

serve a valutare la capacità delle pozzolane nello sviluppare fasi idraulicamente attive.

Test di Pozzolanicità

Da effettuarsi esclusivamente sui cementi pozzolanici CEM IV.

Consiste nel procedere ad una idratazione accelerata (a 40°C per 8 g) di una miscela cemento + acqua che sia soluzione sovrassatura di $Ca(OH)_2$. (quindi di portlandite sostanzialmente)

Dopo questo periodo di contatto, la concentrazione di $Ca(OH)_2$ residua in soluzione dev'essere inferiore ad un limite stabilito per norma, per poter affermare che la prova ha avito esito positivo.

Si capirà il perché quando verranno, nel seguito, spiegate pozzolanicità e idraulicità latente.

XESAME: tipi di cemento, requisiti compositionali di cementi d'altoforno e pozzolanici, requisiti fisici, chimici, meccanici

9. Criteri di conformità

Pagina 13

9.1.2 Controllo statistico.

La normativa impone: I piani di campionamento per un controllo statistico della produzione.

9.1.15 Rischio di non conformità del consumatore

9.1.16 Rischio del produttore

Un rischio definito e minimo di non conformità imposto dalla norma.

Pagina 14

9.2.1. Il criterio di conformità

La definizione e i tre elementi che lo costituiscono.

Viene introdotto un controllo statistico continuo dei parametri che la Norma individua come critici. Le procedure previste per

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 207 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 209 di 324

IL CALCESTRUZZO (CLS) LEZ. 16-05-2011

Conglomerato cementizio: (è un sinonimo di CLS)

- cemento
- H_2O } pasta di cemento
- aggregato (fine e grossolano)
- eventuali additivi

} ci sono sempre

} facoltativi.

Il legante agisce da collante che ricopre, avvolge e collega i singoli elementi lapidei

aggregato: < fine: sabbia (silicea) (< 4 mm)
grossolano: ghiaia e pietrisco (calcareo).

CLS FRESCO

Miscelazione di ingredienti: impasto plastico prodotto in cantiere o in centrali di betonaggio (CLS preconfezionato).
↓ xké maneggiabile
→ N.B.: è diverso da prefabbricato

- lavorabilità: propr. reologiche.
- messa in opera x pompaggio o caduta
- costipazione (vibrazione) nelle casseforme.
- stagionatura (fase in cui si passa a...)

⇓

CLS INDURITO

vero e proprio materiale da costruzione
- sviluppo prop. meccaniche / durabilità.

ACQUA DI IMPASTO.

- essenziale x l'idratazione dei componenti del cemento (è un reagente).
- conferisce lavorabilità all'impasto plastico (adeguata scorrevolezza)
  ↳ è un parametro vero e proprio.

Il rapporto $\frac{a}{c}$ è fondamentale x lo sviluppo delle caratteristiche meccaniche e della durabilità.

Porosità valutata come volume di mercurio che penetra:
Porosimetria a Hg:

Relazione di WASH BURN: $P \cdot r = cost$ (P e r sono inv. proporz.)
(r = "vecchia"; P = pressione del mercurio; r = raggio pore)

→ volume di Hg penetrato = volume dei pori (nei diagrammi).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 209 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 211 di 324

- sostanze (solidi) in sospensione
- sali disciolti (carbonati, bicarbonati, solfati, cloruri, di calcio, Mg, e Na).

→ hanno
- influenzano reologia (lavorabilità), tempi di presa
- efflorescenza sul getto indurito. (depositi salini che danneggiano l'estetica)

Carbonati e bicarbonati (i + comuni) → fino a 2 g/l sono accettati.
↓
+ solubili dei carbonati

↳ (è un valore alto)
↳ è un H_2O "dura".

→ influenzano il tempo di presa: se tenore è > 1 g/l ⇒ vengono richieste prove di presa e resistenza meccanica (alle brevi stagionature).
↳ sono tutte normate!!

Vedi tabella "AGGIUNTE PROF."

Con il c. ap. le cricche in trazione semplice hanno maggiore difficoltà ad "aprirsi".

Poiché il cap è continuamente sotto compressione, i quantitativi di cloruri devono essere < di quelli ammessi nell'H_2O per il c.a., altrimenti corrosione + precompressione hanno effetto sinergico ⇒ STRESS-CORROSION
↳ la precompressione aiuta, facilita la corrosione
è inglese

!! Domanda esame:

Perché qst valori diversi?

Cosa sono i solidi in sospensione? In H_2O naturale (anche potabile !) ci sono finissime (≤ micron) particelle che rimangono flottanti in H_2O (non sedimentano) → argille, residui di origine vegetale, alghe, microorganismi (marcescenze).
in sospensione

Particelle sia organiche che inorganiche.

I limiti variano tra ~~[illegible]~~ CLS e CA (o CAP).

- limite di 2 g/l: aderiscono alle fasi solide dell'impasto (sup dell'aggregato o sup ferri di armatura). Formano una pellicola che riduce molto il legame tra la pasta di cemento e l'armatura o dell'aggregato lapideo.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 211 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 213 di 324

Se ho $\frac{a}{c} = 0,5$ e uso H_2O di mare (5 g/l di solfati, solfati di sodio)
→ aumento di circa 0,25% il tenore in solfati dell'impasto
→ insuff. x avere false prese
→ Ma la normativa mette cmp dei paletti.

Ph: + acidi x il C.A. e C.A.P.

H_2O naturali: 5,8 ÷ 6 Ph (x via di $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$)
un po' acido. → acido carbonico

⇒ H_2O naturali ⇒ vanno bene!! (uso cortine tomasle).

Ma se ho Ph acido ⇒ indice di un probabile inquinamento industriale
(le marcescenze, gli inquinamenti "naturali" creano NH_3 ⇒ BASI CA!!).

Le armature si passivano a Ph molto basici.

C.A. e CAP → innesco fenomeni corrosione armature ⇒ soglia + alta

Sostanze organiche: (zuccheri, fosfati, nitrati, Pb, Zn).

Generalmente in quantità limitate (1 mg/l ÷ qualche decina di mg/l).
in H_2O potabili e fluviali

Rallentano la velocità di presa ⇒ sviluppo di resistenze meccaniche a brevi stagionature (? ritardo scassero ecc... COSTI!!).

Acque di rifiuto e scarichi industriali: qualche 100 di mg/l

Fosfati: fertilizzanti
Nitrati: prodotti finali della decomposizione batterica.
Pb, Zn: ~~materia~~ metalli pesanti ⇒ indice di scarico industriale
↳ dopo settimane l'impasto NON apprende se ci sono Pb e Zn.

AGGREGATO

Normativa UNI 8520

- naturale < alluvionale (sabbie + ghiaie → tondeggianti)
  < di frantumazione (sabbie + pietrisco → a spigoli vivi).
  (escavazione)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 213 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 215 di 324

Ma se prendo "sfere" di Ø diversi, ossia ho un adeguato assortimento di dimensioni, riempio gli spazi intercellari!!

Esiste modello matematico:

Curva di Fuller → max densità apparente:

Equazione di Fuller - Thompson: $P_t = 100 (d/D)^{1/2}$

P_t = % (rispetto al tot di solido) del passante cumulativo al setaccio con apertura di Ø d

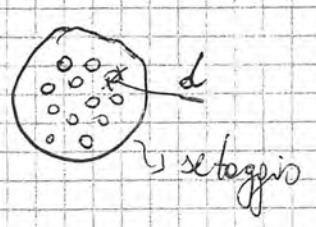
D = Ø max dell'aggregato.

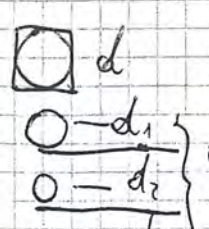
Serve definire D xké l'aggregato va a costituire il CLS fresco che poi va gettato x fare l'opera... Non posso prendere ∀D!! Ho dei vincoli:

- Non deve essere > 25% della sezione minima del getto, per evitare eterogeneità anche nelle risp. meccaniche.
- NON deve > la dist MAX tra i ferri di armatura diminuita di 5 cm, per evitare che un aggreg. grossolano ostruisca il flusso del CLS. evitando così che l'armatura ostacoli il fluire del CLS fresco e stipi gli aggreg. grossi della parte "liquida".
- non deve > 30% dello spessore del copriferro (la prima sezione di ~~getto~~ armatura che incontro quando getto), x evitare l'ostruzione al flusso di CLS tra armature e casseture.

I setacci hanno dimensioni normate. Sono costituiti da aperture di Ø d.

Ho una frazione: NON passante (Ø > d)
passante (Ø < d)





ulteriori setacci... ho una granulometria decrescente ↓ ⋮
in questo modo valuto il PASSANTE CUMULATIVO rispetto al setaccio di apertura d

Uso la setacciatrice automatica

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 215 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 217 di 324

Il valore di D:

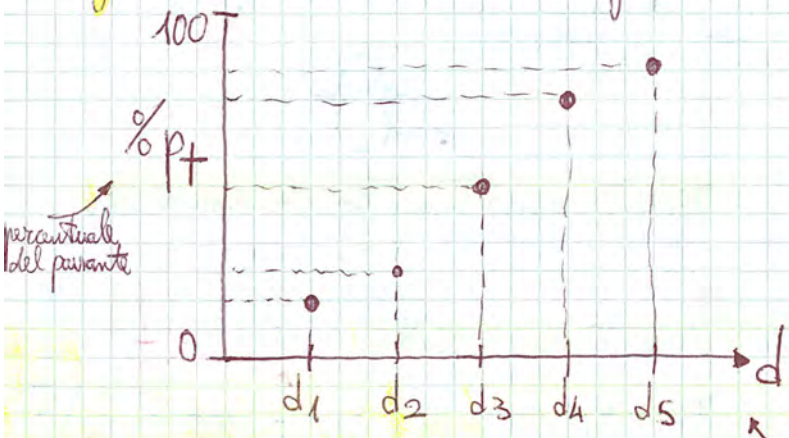
- non deve superare il 25% della sezione minima del getto, per evitare eterogeneità
- non deve superare la distanza massima tra i ferri d'armatura diminuita di 5cm, per evitare che un aggregato grossolano ostruisca il flusso del calcestruzzo
- non deve superare del 30% lo spessore del copriferro* (porzione superficiale, corticale del getto), per evitare l'ostruzione al flusso del calcestruzzo tra armatura e cassaforma.

definisce la distanza tra armatura e cassaforma

Ogni setaccio è costituito da un insieme di aperture (di diametro d)

Il misto granulometrico viene messo in cima ai setacci, cioè sul setaccio con aperture di diametro maggiore.

Una volta effettuata la setacciatura, si va a riportare in un grafico la distribuzione granulometrica ottenuta:



percentuale del passante

sull'asse delle ascisse riporto le aperture.

*: COPRIFERRO:

- da sacobedilelg.eu: nelle costruzioni in calcestruzzo armato è lo spessore che separa l'armatura dalla superficie esterna del getto cementizio. Nel caso di setti, pareti e solette almeno 0,8 cm; nel caso di travi e pilastri almeno 2 cm.
- da Wikipedia: nelle strutture in calcestruzzo armato, è la distanza fra la superficie esterna dell'armatura più prossima alla superficie del calcestruzzo e la superficie stessa del conglomerato

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 217 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 219 di 324

EQ. DI BOLOMEY:

$$p_t = A + (100 - A)\left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

per $A = 0 \Rightarrow$ equaz. di Fuller - Thompson

A cresce per lavorabilità crescente e nel passaggio da aggregati alluvionali (tondeggianti) ad aggregati di frantumazione (irregolari e spigolosi).

Aumento A $\longleftrightarrow$ aumento del contenuto di materiale fine (passante al vaglio con apertura d uguale a 5 mm)

A parità di scorrevolezza, lavorabilità, il parametro A è inferiore per l'aggregato tondeggiante, perché tutte le volte che A aumenta, spostiamo la curva granulometrica verso valori di aggregati più fini!

FORMA / ANGOLARITÀ

- aggregati alluvionali (tondeggianti) → cls più lavorabili
- aggregati di frantumazione (irregolari e spigolosi) → migliore aderenza aggregato / pasta di cemento → → maggiori resistenze.

aumentando l'aderenza, la pasta di cemento trasferisce le sollecitazioni agli aggregati che hanno resistenze maggiori rispetto alla pasta.

aumentano le zone di interfaccia e quindi

UMIDITÀ DELL'AGGREGATO

Umidità (u) → può modificare significativamente il quantitativo di acqua d'impasto → rapporto a/c.

COME SI MISURA LA QUANTITÀ DI UMIDITÀ ???

Misura della diminuzione percentuale di massa, dopo essiccamento completo dell'aggregato a 110° C:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 219 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 221 di 324

CRITERI DI IDONEITÀ (ACCETTAZIONE) degli aggregati (UNI 8520)

- distribuzione granulometrica
- cloruri
- solfati
- silice alcali-reattiva
- limo argilloso
- sostanze organiche
- gelività

Una delle prime caratteristiche che viene valutata anche a livello di cantiere è la pulizia dell'aggregato.

CLORURI

Limite dello 0,05 %

c.a. (cls armato) → rischio di corrosione dei ferri d'armatura

In assenza di armatura → efflorescenze, depositi salini superficiali (danno estetico)

Uso di sabbia di mare possibile, ma prima lavaggio con acqua dolce.

SOLFATI

Come gesso ($CaSO_4 \, 2H_2O$) o anidrite ($CaSO_4$)

Limite < 0,2 %

Formazione di ETTRINGITE SECONDARIA (per lenta solubilizzazione del gesso in cls induritto e reazione con monosolfo-alluminato o con alluminati di calcio idrati)

Netta distinzione tra ettringite primaria e secondaria → composto espansivo in cls induritto → fessurazione.

[Il solfato di calcio del gesso non è subito disponibile come quello presente nell'acqua di impasto, ma compare dopo (6-8-12 mesi dal getto) a causa della lenta solubilizzazione del gesso, ⇒ PROBLEMA: formazione di ettringite secondaria].

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 221 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 223 di 324

GLI ADDITIVI:

PAG. 86

prodotti chimici aggiunti (in centrale di betonaggio o in cantiere prima del getto in casaforma), solitamente in piccole quantità (qualche Kg/m³), al cls per migliorarne una o più prestazioni (UNI 7101, UNI 8145)

L'aggiunta di additivi provoca chiaramente un aumento dei costi.

Additivi più comuni:

- fluidificanti / superfluidificanti: servono a modificare la scorrevolezza, lavorabilità del cls fresco
- acceleranti
- ritardanti
- AERANTI → ne parleremo in capitolo "durabilità"!
- inibitori di corrosione
- impermeabilizzanti / idrofobizzanti
- additivi di superficie (disarmanti, stagionanti)

stagionanti → permetteranno una buona stagionatura del cls nelle prime fasi di vita.

FLUIDIFICANTI / SUPERFLUIDIFICANTI:

il vantaggio non è solo quello di ottenere un cls fresco più fluido: aumentando la fluidità, allora si può diminuire l'acqua d'impasto ⇒ rapporto a/c più basso ⇒ meno pori ⇒ maggiori resistenze.

Informazioni generali:

- polimeri idrosolubili
- F: a base di lignosolfonato
- SF

Quantità di additivo impiegata, rispetto alla massa del cemento, ~ 1% (di solito non oltre il 2%).

Questi additivi distruggono gli agglomerati, i flocculi di polvere di cemento (FIG. 5.16 PAG. 87: bianco = acqua, nero = flocculi di polvere di cemento) ⇒ AZIONE DEFLOCCULANTE → migliore dispersione della polvere di cemento in acqua: rottura di agglomerati, flocculi.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 223 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 225 di 324

FIG. 5.18 PAG. 88

RITARDANTI:

ritardo della PRESA del cemento per:
- mantenere più a lungo la sua lavorabilità
- consentire il trasporto del cls a più lunghe distanze, specialmente in climi caldi

→ bassa resistenza del cls alle brevi stagionature
→ a tempi lunghi notevole recupero di resistenza.

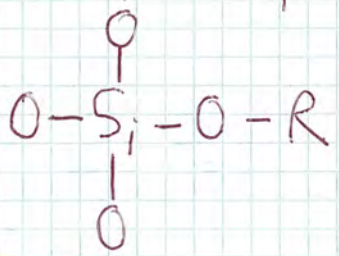
Il ritardante non abbatte le resistenze meccaniche, ma "le fa" comparire più tardi.

composizione:
- carboidrati
- acidi idroxicarboxilici dicarboxilici
- fosfati
- borati
- sali di piombo e di zinco

IMPERMEABILIZZANTI / IDROFOBIZZANTI (waterproofers)

Prodotti IDROREPELLENTI, per lo più a base di alchil-alcossilano (SILANO)

$Si(OR)_4$



$R = -CH_2-CH_2OH$
$R = -CH_2-OH$

Lavorano:
- essere applicati superficialmente per rendere idrorepellente il cls o altri materiali da costruzione inorganici (pietra, mattone, malta)
- essere aggiunti all'impasto (circa 1% in peso rispetto al cemento) per idrofobizzare tutto il manufatto, non solo la superficie → trattamento "in massa"

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 225 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 227 di 324

(fenomeni di scambio tra cloruri e additivi ⇒ azione sinergica).

Però ci sono altri metodi: protezione catodica, impiego di acciai INOX ...
⇒ costi ⊕ alti ma necessari.

Acceleranti | Accelerano la cinetica dell'idratazione alle brevi stagionature
⇒ presa ⊕ breve
⇒ incremento delle resist. meccaniche nei primissimi (acceleranti di indurimento)
• per getti in climi freddi o per capriati disarmi.

Fanno aumentare il grado α di idratazione.

Un tempo a base di cloruri!! $CaCl_2$ in 2% in massa rispetto a massa cemento ⇒ abbandonati (corrosione).

Oggi si usa:
• trietanolammina (derivato dell'ammoniaca)
• formiato di calcio (derivato dell'acido formico).

Fig 5.18

(Gli additivi costano!! Non vanno messi "a caso"!!)

Ritardante

Ritardo della presa del cemento per:
• mantenere ⊕ a lungo la lavorabilità
consentire il trasporto di CLS a distanze ⊕ lunghe, specialmente in climi caldi
(favorevoli all'aumento della cinetica dell'idratazione...).

→ bassa resistenza del CLS alle brevi stagionature
→ a tempi lunghi notevole recupero di resistenza.

Sposta soltanto l'asse dei tempi x i fenomeni di idratazione, non abbatte nel complesso le prop. meccaniche

• zuccheri (carboidrati) mono-bi saccaridi.
• fosfati
• sali di Pb e Zn
• borati

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 227 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 229 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 23-05-20

Disarmanti:

Applicati sulle casseforme:

Modificano tensione superficiale dell'interfaccia CLS fresco - materiale casseforme, creazione di una sottile e continua pellicola sulla casseforme.

Stagionanti (anti-evaporanti, agenti di curing).

Applicati su superfici libere di CLS esposte all'aria.

Formano film impermeabile che contrasta l'evaporazione dell'H_2O dal getto.
Sono di origine organica ⇒ non rimangono in opera ma si degradano per via della radiazione luminosa.

FASI DI PROCESSO:

Costituenti (cemento, H_2O, aggregato, additivi).
↓
Miscelazione
↓
Messa in opera (getto)
↓
Costipamento
↓
Stagionamento

Miscelazione: All'interno delle miscelatrici vengono messi in corrette proporzioni i costituenti. Mantiene omogenea la composizione del CLS fresco fino alla fase di getto.

IL CLS FRESCO

Lavorabilità: attitudine del CLS fresco di essere messo in opera nel minor tempo possibile, al minore consumo di energia senza però perdere compattezza e omogeneità.

tempo ed energia sono parametri che si riferiscono al cantiere.

⇒ dipende dalle caratteristiche REOLOGICHE del CLS.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 229 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 231 di 324

$\eta_{H_2O} = 1\ mPa \cdot s$ // 1 cP a 20°C

η pasta di cemento fresca = 100 ÷ 300 mPas → c'è un range xké dipende del rapporto $\frac{a}{c}$

se $\frac{a}{c}$ ↑, la scorrevolezza aumenta

cemento Portland ⇒

Fig 5.20

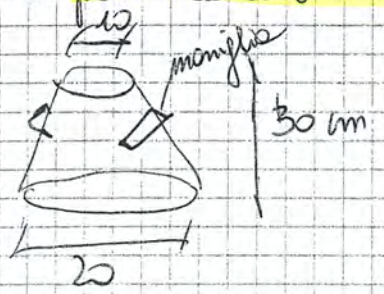
Il tempo dell'impasto è stato "preso" a pari rapporto $\frac{a}{c}$

Il cemento Portland è ⊕ viscoso di gli d'altoforno!! Perché?

Il perché dimmelo tu!!! : ragionare sulle velocità di vibrazione: per attivare la lega basica d'altoforno si deve liberare portlandite che deve liberare dall'vibrazione dei silicati di calcio, ⇒ velocità di vibrazione minore di quella del non sorretti

Per valutare la lavorabilità si fa una prova di cantiere normata da UNI 9417.

È la prova di cedimento al cono di Abrams (Slump Test).



Struttura tronco-conica (anche se è detto "cono" di A.)

La base deve essere liscia! Altrimenti si influenza l'esito della prova

Si riempie il "cono" con 3 strati successivi, costipati con 25 colpi di un tondino di ferro di ca 16 mm di Ø

Il livello del CLS deve essere pari all'altezza del cono.

Poi si "sfila" il cono, lasciando il CLS libero di assestarsi, cedere solo sotto il suo peso... Il CLS si abbassa in altezza

Slump: "cedimento".

Fig 5.21.

- Slump vero: cedimento omogeneo: definisce un CLS ben confezionato.
- Slump di taglio: una porzione scorre meno di un'altra
- collasso: cedimento significativo, ≥ 20 cm ⇒ segnale fluidità eccessiva del CLS fresco.

Uno slump vero va sempre bene!

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 231 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 233 di 324

b) Data una classe di consistenza ecc ecc...

Tab 5.4 ⇒ c'è quasi sempre all'esame!!

Perché i parametri variano in questo modo?

Mi dice il tenore di H_2O a seconda della lavorabilità del CLS e contenuto aggregato con diverso D_{max}.

(1) Prendo diametro costante (9,5 mm), prendo tipologia costante (prendo il tondeggiante). Vedo che passo da 190, 200, 230 litri al crescere del valore di slump. Ho confermato la 1ª regola di Lyse.

(2) Ora fissiamo la tipologia, la lavorabilità, ma variamo il D_{max}. Al crescere del D_{max} vedo che x avere stessa lavorabilità x stesso tipo di aggregato passo da 190 a 135 l. Ho confermato la 2ª regola di Lyse.

Spiegazione:

(1) Crescere slump, significa essere + fluidi, ma nel CLS l'unica fase "scorrevole" è l'acqua!! Aumento tenore di H_2O (se non uso additivi fluidificanti e superfluidificanti)

(2) L'H_2O diminuisce al crescere del D_{max}, xké la correlazione è data dal fatto che l'H_2O deve bagnare la superficie tra aggregato e pasta. A pari volume, il CLS con granulometria + fine mette a disposizione + superficie!!

Quindi a pari volume la distribuzione grossolana richiede ⊖ H_2O.

(3) Faccio un confronto a pari lavorabilità, a pari D_{max}, tra tondeggiante e spigoloso. L'aggregato tondeggiante richiede ⊖ H_2O, qst xké l'aggregato tondeggiante ha una forma che favorisce la movimentazione nel CLS fresco.

Tab. 5.5. → gli superfluidificanti, per piccole aggiunte di acqua, possono diventare sempre più fluidi.

Variazioni di 3 cm di slump richiedono % aggiuntive di H_2O differenti.

Quindi anche piccole aggiunte d'H_2O variano notevolmente le classi di slump.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 233 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 235 di 324

(b) A PARITÀ DI LAVORABILITÀ (stessa classe di consistenza) l'aggiunta di superfluidificante mi permette di diminuire il dosaggio in acqua.

$c = 305\ Kg/m^3$ $\qquad$ $c = 305\ Kg/m^3$

$a = 160\ Kg/m^3$ $\qquad$ $a = 134\ Kg/m^3$

+ superfluidificante (1%)

$a/c = 0{,}55 \Rightarrow R_{ck} = 35\ MPa$ $\qquad$ $a/c = 0{,}44 \Rightarrow R_{ck} = 45\ MPa$

Avendo un rapporto a/c inferiore, il calcestruzzo additivato svilupperà una resistenza a compressione a 28 giorni maggiore di quella del cls non additivato.
Poiché diminuisco il dosaggio d'acqua, affinché venga occupato il volume che sarebbe stato occupato dall'acqua ($160\ Kg/m^3 - 134\ Kg/m^3 = 34\ Kg/m^3$), non modifico il dosaggio di cemento ma aumento il dosaggio delle due categorie di aggregato (chiaramente rispettando la curva granulometrica (non è che posso aggiungere solo aggregato fine o solo aggr. grossolano!).

Abbassando il rapporto a/c $\Rightarrow$ minore porosità $\Rightarrow$ minore permeabilità $\Rightarrow$ maggiore resistenza meccanica $\Rightarrow$ maggiore durabilità

(c) 3° esempio: A PARITÀ DI SLUMP (24 cm) (CLASSE DI CONSISTENZA S_5), cioè a parità di lavorabilità, aggiungiamo il superfluidificante diminuendo sia il dosaggio in acqua, sia il dosaggio in cemento, ma aumentando il dosaggio di aggregato (minore ritiro, minore deformabilità, minore esotermia del getto).
INFATTI:
Diminuendo il quantitativo di aggregati (a favore di) aumentando cemento ed acqua, il manufatto tenderebbe a contrarre di più ed inoltre teniamo meno sotto controllo l'esotermia, lo sviluppo termico del getto (perché cemento e acqua sono quelli che fanno aumentare il calore di idratazione).
Inoltre avrò deformazioni sotto carico maggiori del manufatto, poiché manca lo scheletro rigido.

CLASSICA DOMANDA D'ESAME: 2 PARTI
1. definire cosa sono gli additivi fluidificanti e superfluidificanti e definire come operano
2. quali sono le possibili modifiche apportate nella composizione delle miscele e nelle dosi dei singoli inerti

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 235 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 237 di 324

Sotto $a/c = 0{,}42$ ha poco senso diminuire ulteriormente il rapporto, perché altrimenti non avremmo acqua per garantire la completa idratazione delle fasi del cemento stesso.

MESSA IN OPERA DEL CLS FRESCO: GETTO

CASSERI: in acciaio, in legno (utilizzati per piccole opere o per lasciare una memoria facciavista superficiale del legno), in materiale plastico (vanno riempite con maggiore cautela, perché sono meno resistenti).

PAG. 96

FIG. 5.27: 1° caso (a sinistra): tubo di pompaggio lasciato molto in alto ⇒ l'impasto cade per gravità e non viene accompagnato ⇒ gli aggregati più grossolani cadono prima ⇒ SEGREGAZIONE (nidi di ghiaia, vespai)

2° caso (a destra): riempimento corretto: il cls viene rilasciato quanto più possibile ad una piccola distanza da terra ⇒ piano piano viene tirato su ⇒ NO SEGREGAZIONE

COSTIPAMENTO

Quando il cls viene introdotto nelle casseforme contiene dal 5 al 20% in volume di aria intrappolata, a seconda della sua lavorabilità. Per eliminare tale aria (che il cls fresco tende ad intrappolare all'interno del cassero (dato che chiaramente nel cassero c'è aria!)) occorre compattare (costipare) l'impasto.

Se non avviene costipamento, rimane aria ⇒ porosità ⇒ minori resistenze meccaniche.

Il costipamento permette alle bolle d'aria di risalire all'interno del cls fresco e di emergere dalla superficie del cls fresco stesso.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 237 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 239 di 324

FIG. 5.17: a pari rapporto a/c, dopo 5 secondi di vibrazione, per S_5 arriviamo a costanza di prestazioni.
PAG. 88

FIG. 5.22: il fattore (o grado) di compattazione è fortemente condizionato dalla classe di consistenza e quindi dal valore di slump.
PAG. 93

STAGIONATURA (curing)
PAG. 96

: rappresenta la transizione tra il cls fresco e il cls rappreso (sempre più induritto).

Procedure attuate, a seguito del getto, per promuovere la presa e l'indurimento.

PARAMETRI PIÙ SIGNIFICATIVI DA CONTROLLARE:

- UMIDITÀ (perché bisogna controllare il quantitativo dell'acqua di impasto, perché a contatto delle fasi anidre deve poter sviluppare i prodotti di idratazione)
- TEMPERATURA (perché aumentando la temp., aumenta la cinetica delle reazioni)

Le NORME definiscono precisamente il tempo di stagionatura. In linea di massima: DURATA DI ALMENO 7 GIORNI oppure per un tempo necessario a sviluppare il 70% della resistenza a compressione richiesta dal manufatto.

STAGIONATURA
- ORDINARIA
- ACCELERATA (usata negli impianti di prefabbricazione): il manufatto viene esposto ad acqua vapore ⇒ si espone il getto alle alte temperature ⇒ aumenta la cinetica delle reazioni.

il manufatto viene avvolto in teli polimerici in cui si mantiene il manufatto a contatto con acqua vapore (alle alte temp.)

FIG. 5.28 evoluzione della resistenza meccanica in funzione del tempo a seconda della metodologia di stagionatura.
Se lasciamo il getto continuamente all'aria ⇒ lasciamo che l'acqua si liberi rapidamente ⇒ non tutte le fasi anidre riescono ad idratarsi (per dar vita a fasi idrate).
Se lasciamo il materiale in ambiente umido per 3 giorni prima di esporre esso all'aria ⇒ resistenze maggiori rispetto a prima

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 239 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 241 di 324

MIX DESIGN
Collegandi
ENCO - JOURNAL

nare rinnovando quindi la superficie di scambio → più evaporazione tra getto e aria
⇒ ↑ vento ↑ evaporazione

- **TEMPERATURE AMBIENTALI**: tanto più sono alte ⇒ tanto più sono alte le cinetiche delle reazioni di idratazione.

STAGIONATURA OTTIMALE: T ~ 20°C, U.R. ~ 80%; velocità vento ~ 4 m/s (brezza quasi sensibile)

"SOLUZIONI OPERATIVE" IN CANTIERE:
La casaforma riduce la superficie di scambio → riduce l'evaporazione.
Si mettono dei teli per ridurre l'evaporazione.

LEGGE DI ABRAMS

La resistenza meccanica (a compressione) R ad una determinata stagionatura ed ad una data temperatura aumenta al diminuire del rapporto a/c, secondo l'equazione:

$$R = \frac{K_1}{(K_2)^{a/c}}$$

K_1, K_2 = costanti che dipendono dal tempo e dalla T di stagionatura, e dal tipo di cemento.

PAG. 97

FIG. 5.29: sviluppo della resistenza a compressione (a 28 giorni e a 1 giorno dell'impasto) in funzione della temp. di stagionatura. (quindi temp. di stagionatura bassa)

Se le fasi idrate si sviluppano lentamente ⇒ meno porosità, poiché maggiore intreccio tra gli aghi di C-S-H ⇒ a tempi lunghi ⇒ altri valori di resistenza.
Invece se le temperature sono molto alte ⇒ le resistenze

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 241 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 243 di 324

Se si mantenesse il cls costantemente in acqua ⇒ non ci sarebbe il fenomeno del ritiro!!!

CLS INDURITO PAG. 100

A parità di tutti gli altri parametri compositionali, le proprietà meccaniche del cls indurito dipendono fortemente dal rapporto a/c.

Se confezioniamo il cls con un rapporto a/c alto ⇒ basse proprietà meccaniche.

Quindi devo sì avere maggiore lavorabilità, ma non aumentando la dose d'acqua, bensì usando i SUPERFLUIDIFICANTI.

Inoltre, aumentando il dosaggio di cemento, aumentano le fasi silicato di calcio ⇒ proprietà meccaniche più alte.

INFLUENZA DELLA TEMPERATURA E DEL TEMPO SULLO SVILUPPO DELLA RESISTENZA MECCANICA DEL CLS:

nel tempo, il materiale che si è idratato e ha reagito più lentamente (quindi a temp. di stagionatura basse), sviluppa propr. meccaniche maggiori.

Il CLS è un materiale composito, costituito da:

- MATRICE LEGANTE: pasta di cemento indurita
+
- RINFORZI: aggregato fine e grossolano

= composito = cls

VEDI FIGURA PAG. SEGUENTE IN ALTO

I due componenti a sè stanti sono CERAMICI ⇒ diagramma σ-ε rettilineo: gli aggregati hanno una linea con pendenza maggiore rispetto alla pasta di cemento, perché il modulo elastico di Young è più alto (maggiore rigidezza).

Accoppiando questi due materiali completamente fragili, otteniamo un composito (CLS) non più completamente fragile, ma con un tratto anche plastico e inoltre aumenta la tenacità.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 243 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 245 di 324

Per il cls:
Dopo una prima fase elastica, c'è una fase plastica ⇒ deformabilità, ma tale deformabilità è molto, molto contenuta.
Aumenta, inoltre l'energia di rottura.

CLS INDURITO : FLUAGE del cls

Comportamento viscoplastico

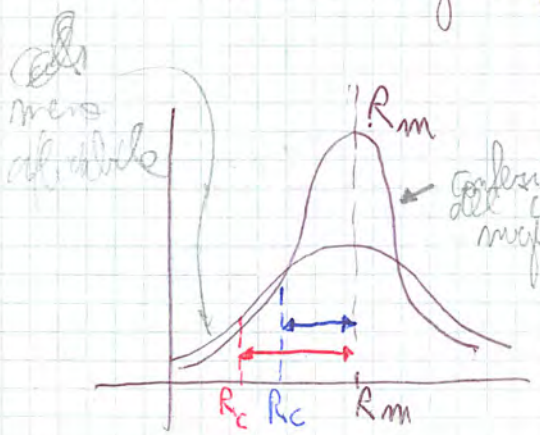
FIG. 7.36 deformazione viscoelastica e deformazione viscoplastica del cls, dovute al fatto che il cls è un composito ⇒ per evento matrice legante e rinforzi materiali fragili, la loro interazione dà un composito con comportamento viscoelastico e viscoplastico.

PAG. 102

FIG. 5.35 : R_{ck} = resistenza caratteristica

Ogni qualvolta si crea una struttura in cls, vengono prodotti provini per valutare la variabilità della risposta meccanica.
La distribuzione ad istogrammi rappresenta i veri valori delle resistenze.
Utilizzando la gaussiana, otteniamo una curva continua che mi permette di avere una resistenza media R_m (che però non può essere rispettata perché molto alta) ⇒ si definisce un valore soglia R_{ck} che esclude il 5% dei provini

R_{ck} → parametro meccanico valutato su base statistica per ridurre del 5% il criterio di accettabilità degli scarti.



Se la gaussiana è più ampia ⇒ dispersione maggiore ⇒ maggiore affidabilità ⇒ minore dispersione ⇒

Il materiale è tanto meno affidabile quanto più la gaussiana è ampia.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 245 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 247 di 324

Appendice 5) Calcestruzzo: approfondimenti

LEZ. 16-05-2011

1. L'acqua d'impasto: requisiti di accettabilità

L'acqua è uno dei tre protagonisti indispensabili – insieme a cemento ed aggregati – nel processo produttivo del calcestruzzo (**cls**); senza di essa il cls non può essere prodotto perché il cemento non si idraterebbe e di conseguenza non andrebbe soggetto a presa ed indurimento! Tuttavia, se si esagera con l'acqua d'impasto, si confeziona un cls mediocre in termini di resistenze meccaniche e durabilità. La tentazione ad eccedere con l'acqua d'impasto non è infrequente, in quanto, a differenza degli altri due ingredienti del cls, l'acqua ha un costo pressoché nullo (quindi, abbondare in acqua non comporta alcun aumento del costo del prodotto finito) ed inoltre un eccesso di acqua permette di ottenere un cls fresco più fluido, più lavorabile, e quindi più gradito in cantiere agli addetti alla sua messa in opera. Attenzione quindi che la riaggiunta di acqua in cantiere, seppur in uso, può avere conseguenze gravi sulle prestazioni dell'opera ed in tal caso il direttore dei lavori se ne assume piena responsabilità. Torneremo più avanti su questo argomento, parlando delle relazioni che intercorrono tra contenuto di acqua (soprattutto definito attraverso il rapporto a/c), lavorabilità, prestazioni meccaniche e durabilità.

Tutte le **acque potabili** sono idonee al confezionamento dei calcestruzzi.

La maggior parte delle acque naturali (compresa quella di mare), anche se aggressive nei confronti del calcestruzzo indurito, possono essere tranquillamente usate per il confezionamento di calcestruzzi non armati, mentre estrema prudenza richiede l'uso di acque di scarico industriale o di acque naturali inquinate da scarichi industriali.

Non si deve porre attenzione unicamente al quantitativo d'acqua impiegato per il confezionamento del calcestruzzo o della malta, ma anche alla sua composizione. Le sostanze che si trovano in sospensione, i sali disciolti (i più comuni sono i carbonati, i bicarbonati, i solfati, i cloruri di calcio, magnesio e sodio) intervengono nella presa del cemento e nella reologia del conglomerato; inoltre, possono dar luogo ad efflorescenze sul getto indurito.

Le **sostanze in sospensione**, le quali possono essere costituite da argilla, residui d'origine vegetale, alghe, microrganismi, non dovrebbero superare i 2 *g/l* in quanto possono interferire con il processo d'indurimento del cemento e, soprattutto, indebolire l'adesione tra aggregato e pasta di cemento con conseguente peggioramento delle resistenze meccaniche (Tabella 1).

Tra le **sostanze disciolte** meritano attenzione, per le possibili conseguenze sulle prestazioni del calcestruzzo fresco od indurito, i carbonati ed i bicarbonati, i solfati, i cloruri e le sostanze organiche.

I carbonati ed i bicarbonati sono tollerati in un'acqua d'impasto fino a valori di 2 *g/l*. La loro presenza influenza i tempi di presa e, pertanto, quando sono presenti in tenori superiori al grammo per litro, è conveniente effettuare prove di presa e resistenza meccanica di riferimento.

I solfati sono ritenuti agenti fortemente aggressivi quando contenuti in acque che possano bagnare un calcestruzzo già indurito. Tuttavia, la loro presenza in un'acqua d'impasto non deve suscitare eccessiva preoccupazione: usando come acqua d'impasto con rapporto acqua/cemento pari a 0,5 (50 l acqua/ 100 kg cemento) dell'acqua di mare che contiene circa 5g/l di solfati (per lo più, si tratta soprattutto di solfato di sodio), si aumenta di circa lo 0,25% il tenore in solfati dell'impasto, non causando quindi nessuna conseguenza apprezzabile sulle caratteristiche dell'impasto.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 247 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 249 di 324

- esso contribuisce alle resistenze meccaniche ed alla durabilità del conglomerato cementizio,
- ne contrasta il ritiro da idratazione;
- permette di ridurre la quantità di legante (cemento) da utilizzare, portando ad una riduzione dei costi e del calore di idratazione.

Queste ragioni spiegano perché circa ¾ del volume di un calcestruzzo è costituito dall'aggregato.

Non tutti gli aggregati – naturali o provenienti da roccia frantumata – sono necessariamente idonei alla produzione del cls. Esistono alcuni requisiti fondamentali **(criteri di idoneità** o di **accettazione)** in assenza dei quali il cls rischia di essere degradato. Le prove che permettono di definire l'accettabilità dell'aggregato debbono essere effettuate preventivamente al primo impiego dello stesso nel cls e poi ripetute annualmente, a meno che non si manifestino eventi che possano far sospettare una variazione della qualità e della fonte di approvvigionamento.

Il contenuto limite di **cloruri** è pari alo 0,05% in peso ed è correlato al rischio di corrosione dell'armatura; nei cls privi di armatura metallica la presenza di cloruri nell'inerte non comporta alcun rischio di serio degrado, ma può indurre un danno superficiale per la formazione di depositi salini sulla superficie dei manufatti esposti a cicli alternati di bagnatura ed asciugatura. Per lo più gli aggregati inquinati da cloruri sono identificabili con la sabbia di mare. Questa può essere impiegata come frazione fine di un aggregato per cls, purché il sale idrosolubile (cloruro di sodio) sia rimosso attraverso preventivo lavaggio in acqua potabile.

I **solfati** possono essere presenti nell'aggregato sotto forma di gesso ($CaSO_4.2H_2O$) o di "anidride" ($CaSO_4$). La presenza di solfati oltre un certo limite (0,2 % in peso) comporta il rischio di fessurazione, per lento rilascio di solfati nel cls oramai indurito e conseguente formazione di ettringite secondaria.

A differenza delle sabbie marine, che possono eventualmente essere private di cloruri per lavaggio, gli aggregati inquinati da gesso o da anidride non possono essere bonificati con alcun trattamento e debbono essere scartati dalla produzione di cls. Con sospetto debbono anche essere considerati gli aggregati contenenti minerali a base di solfuri (quali la pirite, FeS_2), che, seppur a tempi più lunghi, possono ossidarsi a solfati e generare fenomeni espansivi e dirompenti.

Attualmente la presenza di **silice reattiva** in un aggregato rappresenta la più insidiosa ed erratica forma di degrado del cls; ciò dipende dal concorso di più cause:

- la presenza di silice reattiva nell'aggregato può essere accertata con molta difficoltà e a tempi lunghi;
- la silice reattiva è distribuita in forma discreta (alcuni granuli di aggregato la contengono, altri no): questo comporta il rischio di non evidenziarne la presenza se il campione prelevato non è statisticamente significativo;
- La reazione alcali-aggregato dipende dal contenuto di alcali del cls; un contenuto di alcali superiore ai 2 kg/m^3 di cls è considerato pericoloso;
- La reazione alcali-aggregato si manifesta solo in presenza di umidità e si verifica più frequentemente in ambienti esterni. Tuttavia, in ambienti interni, può presentarsi il fenomeno, ad esempio in pavimentazioni industriali esposte alla risalita capillare di acqua dal terreno;

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 249 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 251 di 324

Tabella 3
Distribuzione granulometrica dell'aggregato ottimale, di quelli disponibili (sabbia e ghiaia) e della miscela di aggregato realmente ottenibile

Apertura (mm) del setaccio	**Passante al setaccio (%)**					
	Aggregato ottimale	Sabbia	Ghiaia	Contributo sabbia	Contributo ghiaia	Aggregato ottenuto
19,10	100	100	100	48	52	100
9,52	72	100	52	48	25	73
4,76	48	100	0	48	0	48
2,38	35	81	0	39	0	39
1,19	25	58	0	28	0	28
0,59	17	37	0	18	0	18
0,30	12	26	0	12	0	12
0,15	7	14	0	7	0	7
0,075	3	5	0	2	0	2
0,038	0	0	0	0	0	0

CONTRIBUTO SABBIA + CONTRIBUTO GHIAIA = AGGREGATO OTTENUTO

tutti e due passano al passante di diametro 19,10 ⇒ la curva di Fuller è rispettata.

↳ il 48% di ghiaia si ferma al setaccio con apertura di 9,52 ed il 52% a quello di apertura 4,76.

Un cls che soddisfa granulometricamente l'equazione di Fuller-Thompson e, quindi, presenta il massimo impacchettamento possibile, non coincide con un impasto che possa essere facilmente messo in opera, perché soggetto ad un difficile scorrimento. Si tratta pertanto di un cls poco lavorabile (vedasi paragrafo dedicato alla lavorabilità) e che richiederà in cantiere di mezzi di compattazione molto efficienti per la sua corretta messa in opera.

Per queste motivazioni, la curva granulometrica "ideale" è stata modificata da **Bolomey**, che ha introdotto il parametro *A*, che tiene appunto conto delle esigenze di lavorabilità (facilità di messa in opera e costipamento) e del tipo di aggregato disponibile (alluvionale o di frantumazione):

$$P = A + (100-A)\,(d/D_{max})^{1/2}$$

Quest'equazione coincide con quella di Fuller-Thompson per $A = 0$. Il parametro *A* assume valori crescenti (da 8 a 14) per lavorabilità crescente e nel passaggio da aggregati alluvionali (tondeggianti) ad aggregati di frantumazione (irregolari e spigolosi). L'aumento del parametro *A* comporta un aumento del contenuto di materiale fine (cioè del passante *P* al vaglio con apertura *d* uguale a 5 mm) (Tabella 4).

Tabella 4 – Valori ottimali di *A* in funzione del tipo di aggregato e di lavorabilità

Aggregato	**Consistenza umida**	**Consistenza plastica-semifluida**	**Consistenza fluida-semifluida**
Alluvionale	8	10	12
Frantumato	10	12	14

L'**umidità** dell'aggregato è un parametro che ha forte incidenza sulla costanza di qualità del cls, in termini di resistenza caratteristica e di lavorabilità.

L'umidità dell'aggregato può modificare significativamente il quantitativo di acqua d'impasto e conseguentemente il rapporto *a/c*.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 251 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 253 di 324

L'aggiunta di un **ritardante** ha come obiettivo quello di ritardare la presa del cemento al fine di mantenere più a lungo la sua lavorabilità, consentire il trasporto del calcestruzzo a più lunghe distanze, specialmente in climi caldi. Bisogna però sottolineare che il ritardante non dilata solo il tempo di presa ma ritarda anche l'indurimento, il che comporta una bassa resistenza del calcestruzzo alle brevi stagionature, anche se a tempi lunghi il recupero di resistenza é notevole. Esempi di ritardanti sono carboidrati (zuccheri mono e polisaccaridi), gli acidi idrossicarbossilici dicarbossilici, i fosfati, i borati, i sali di piombo e di zinco. Il ritiro plastico da idratazione può essere aumentato in presenza di tali additivi, in quanto un impasto additivato con ritardante si trova esposto per un periodo più lungo all'eventuale azione dell'essiccamento. Ciò induce a suggerire che la bagnatura dei getti o la loro protezione con teli o pellicole anti-evaporanti sia garantita per tempi più lunghi, per evitare l'essiccamento del getto non ancora indurito.

Gli additivi **inibitori di corrosione** sono aggiunti all'impasto per prevenire la corrosione delle armature, per lo più indotta da cloruri. Molto diffuso a tal scopo è il nitrito di calcio, $Ca(NO_2)_2$. La loro efficacia è attualmente messa in dubbio, perché sembra che nel caso di cls fessurati superficialmente la presenza di questi additivi addirittura aggravi l'aggressione. In ambienti fortemente aggressivi, pertanto, si suggeriscono altri metodi, ben più efficaci, di prevenzione (protezione catodica, impiego di acciai inossidabili – si veda la trattazione specifica dei problemi di corrosione).

Gli **impermeabilizzanti** o **idrofobizzanti** (*waterproofers*) sono dei prodotti idrorepellenti, per lo più a base di alchil-alcossi-silano (**silano**), solitamente applicati sulla superficie per rendere idrorepellente il cls o altri materiali da costruzione inorganici (pietra, mattone, malte). Gli stessi possono però essere aggiunti anche nell'impasto (circa 1% in peso rispetto al cemento) per idrofobizzare il cemento in tutta la sua massa, non solo in superficie. Tale trattamento "in massa" appare molto promettente nelle applicazioni di cls esposti alle classi di esposizione più aggressive (vedasi trattazione della durabilità del cls), quali la XF4 (cloruri + sali disgelanti) o XS3 (acque marine in condizione di bagnasciuga). In questi casi l'aggressione è veicolata dall'acqua che penetra nel cuore del cls: in presenza del silano, però, l'acqua ambientale viene respinta dal cls in quanto l'angolo di contatto θ è diventato $>90°$ e, conseguentemente, la pressione capillare diventa negativa:

$$Pc = 2\,\gamma \cos\theta / r$$

Esistono anche i cosiddetti **additivi di superficie** (disarmanti e stagionanti), definibili come quelli che, anziché essere aggiunti all'impasto vengono applicati sulla superficie del calcestruzzo fresco ed hanno come funzione di migliorare l'aspetto superficiale (*faccia-vista*) della struttura o di evitare che le condizioni ambientali possano danneggiare le caratteristiche del materiale (ad esempio a causa di un'eccessiva evaporazione).

Sono additivi di superficie i **disarmanti**, applicati sulle casseforme che verranno a contatto con il calcestruzzo fresco, e che hanno la funzione di facilitare il distacco tra cassaforma e calcestruzzo indurito. Essi sono costituiti da miscele di oli minerali e

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 253 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 255 di 324

Nel caso (a) l'effetto immediato è un aumento della fluidità dell'impasto (Tabella 5). Il passaggio da una consistenza S1 ad una consistenza S5 comporta comunque la necessità di aumentare il rapporto tra aggregato fine e grosso (sabbia/ghiaia) per ridurre il rischio di segregazione. L'aumento di lavorabilità, infatti, comporta l'adozione di una costante *A* di Bolomey maggiore e, conseguentemente, un maggior contenuto di aggregato fino ed un minor contenuto di quello grosso.

Tabella 5 – Effetto dell'aggiunta di un superfluidificante senza sostanziale modifica della composizione del cls

	Cls iniziale	**+ superfluidificante (1%)**
Cemento	320 kg/m^3	320 kg/m^3
Acqua	144 kg/m^3	144 kg/m^3
Aggregato fine	800 kg/m^3	820 kg/m^3
Aggregato grosso	980 kg/m^3	960 kg/m^3
Slump	2 cm	24 cm
Rapporto a/c	0,45	0,45
R_{ck}	45 MPa	45 MPa

Il vantaggio nell'impiegare l'additivo con queste modalità consiste nell'ottenere una maggiore affidabilità del getto, che tenderà a presentare un elevato grado di compattazione.

Nel caso (b) si dice che l'additivo è utilizzato come super-riduttore d'acqua (*high-range water reducer, HRWR*), in quanto lo si usa per ridurre l'acqua d'impasto a pari lavorabilità (Tabella 6).

Tabella 6 – Effetto dell'aggiunta di un superfluidificante con riduzione dell'acqua d'impasto

	Cls iniziale	**+ superfluidificante (1%)**
Cemento	305 kg/m^3	305 kg/m^3
Acqua	168 kg/m^3	134 kg/m^3
Aggregato fine	820 kg/m^3	860 kg/m^3
Aggregato grosso	1010 kg/m^3	1060 kg/m^3
Slump	12 cm	12 cm
Rapporto a/c	0,55	0,44
R_{ck}	35 MPa	45 MPa

Con un dosaggio dell'1% di superfluidificante, si può ridurre l'acqua del 20-30%. Se non si modifica il dosaggio in cemento, si avrà una riduzione sensibile del rapporto a/c senza alterare la lavorabilità, il che porta ad una minore porosità e permeabilità del cls, ad una sua maggiore resistenza meccanica e durabilità.

Infine, il caso (c) può essere visto come la combinazione dei due esempi precedenti. Si supponga di avere a disposizione un cls non ancora additivato a consistenza superfluida (S5), grazie ad un dosaggio elevato d'acqua, ma meccanicamente resistente, durevole ed impermeabile, perché si è adottato un basso rapporto a/c (Tabella 7). Questo risultato lo si è ottenuto solo attraverso un dosaggio in cemento abbastanza elevato. L'elevato quantitativo di acqua comporta anche un ridotto contenuto di aggregato ed un basso rapporto aggregato/cemento, il che presenta inevitabilmente la tendenza ad un elevato ritiro idrometrico. Inoltre, il forte dosaggio in

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 255 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 257 di 324

dall'efficacia della compattazione in opera, cioè dalla qualità della manodopera di cantiere, e pertanto più affidabile.

Se si confrontano le resistenze a compressione a 28 gg di due cls ottenuti con lo stesso cemento, ma a classe di consistenza diversa (S2 e S5, quest'ultima raggiunta grazie all'aggiunta di additivo superfluidificante, a parità di rapporto a/c), si può notare che il cls a consistenza S5 dà il massimo della prestazione meccanica (ca 35 MPa a compressione a 28 gg) purché sia stato vibrato per almeno 5 secondi. Il cls a minor consistenza (S2) presenta una pari resistenza a compressione solo se la vibrazione è stata protratta per oltre 25 secondi. Tale cls vibrato per soli 5 secondi arriverebbe ad una resistenza a compressione a 28 gg di appena 22 MPa. Infine, in completa assenza di vibrazione, la resistenza meccanica del cls a consistenza superfluida arriverebbe comunque a circa 30 MPa (più dell'85% del valore massimo, pari a 35 MPa, ottenibile con questo cls), mentre quella del cls a consistenza S2 raggiungerebbe appena il 40% di quel valore (circa 14 MPa).

5. La posa in opera del calcestruzzo

Il trasferimento del conglomerato dalle betoniere nelle casseforme e la successiva costipazione devono avvenire in modo tale da assicurare un riempimento completo con calcestruzzo omogeneo. Occorre evitare che il conglomerato cada dall'alto urtando le armature o le pareti delle casseforme o formando cumuli: se ciò accade, l'aggregato grosso può segregarsi e concentrarsi in volumi delimitati del getto, formando i **nidi di ghiaia** o **vespai**.

Si ricordi inoltre, facendo riferimento al confronto tra cls a parità di cemento impiegato e di rapporto a/c fatto alla fine del paragrafo precedente, che in un cls superfluido (S5) non si formano vespai, sia che venga vibrato o meno, ed i difetti di getto sono facilmente eliminabili nei primi 5 secondi di vibrazione. In un cls meno lavorabile (S2), i vespai si formano nel cls non vibrato e scompaiono solo dopo 25 secondi di vibrazione.

Il calcestruzzo può essere deposto nelle casseforme mediante trasporto a pressione (ottenuta con pompe a pistone, aria compressa o pompe peristaltiche) in tubi rigidi o flessibili. Il pompaggio è particolarmente utile quando lo spazio disponibile è limitato o ci sono difficoltà di accesso.

Il calcestruzzo proiettato si impiega invece per realizzare velocemente strati di conglomerato su superfici poco stabili (scarpate o gallerie) così stabilizzandole, senza dover costruire casseforme, Tali strati costituiscono talora il rivestimento definitivo o, altrimenti, il rivestimento vero e proprio viene in seguito realizzato con calcestruzzo gettato in casseforme.

Bleeding (dall'Inglese *to bleed*, essudare) definisce la raccolta d'acqua sulla superficie del cls gettato.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 257 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 259 di 324

la velocità delle reazioni di idratazione, con rapida perdita della lavorabilità; l'acqua d'impasto evapora più facilmente, accentuando il ritiro plastico con possibile formazione di fessurazioni; a causa della presa più rapida, i getti successivi non aderiscono bene l'uno all'altro.

In tali circostanze si possono adottare le seguenti precauzioni: i getti vanno eseguiti di mattina, alla sera o di notte; si usano cementi a più basso calore di idratazione, oppure si aggiungono additivi ritardanti; dopo il getto si mantengono bagnate le superfici dei getti annaffiando mediante nebulizzatori (senza dilavare le superfici, però) o con teli bagnati e si ergono barriere frangivento, per limitare l'evaporazione; si raffreddano i costituenti prima dell'impasto (inerti immagazzinati all'ombra, acqua fredda o con aggiunta di ghiaccio).

A temperature basse, invece (getti in climi freddi) si hanno i seguenti inconvenienti: ritardo nello sviluppo delle resistenze; pericolo di congelamento dell'acqua di impasto; maggiore pressione sulle casseforme. Se il ghiaccio si forma prima della presa (periodo dormiente), quest'ultima viene soltanto rimandata al momento del disgelo, dopo il quale le reazioni d'idratazione riprendono. Invece, se il ghiaccio si forma nel corso della presa, a causa del suo effetto espansivo, si ha il danneggiamento dello scheletro dei silicati idrati in via di formazione con notevoli perdite di resistenze. In queste condizioni non si eseguono getti se la temperatura è inferiore a 0°C o se si prevede che tale temperatura possa verificarsi nelle 24 ore. Si possono impiegare additivi acceleranti, che aumentando la velocità di reazione fanno sviluppare più rapidamente il calore di reazione, mantenendo la temperatura del getto più elevata. Si può anche ricorrere al pre-riscaldamento degli inerti con vapore. Le casseforme possono essere protette con materiali coibenti (ad esempio, con polistirolo espanso) o riscaldate all'esterno con vapore acqueo, acqua calda o con resistenze elettriche.

LEZ. 24-05-2011 Si ricorda che le casseforme comunemente utilizzate sono in legno, in acciaio, in materiale plastico. Quando il calcestruzzo viene introdotto nelle casseforme contiene dal 5 al 20% in volume di aria intrappolata (Figura 1), a seconda della sua lavorabilità. Per eliminare tale aria, occorre compattare (costipare) l'impasto.

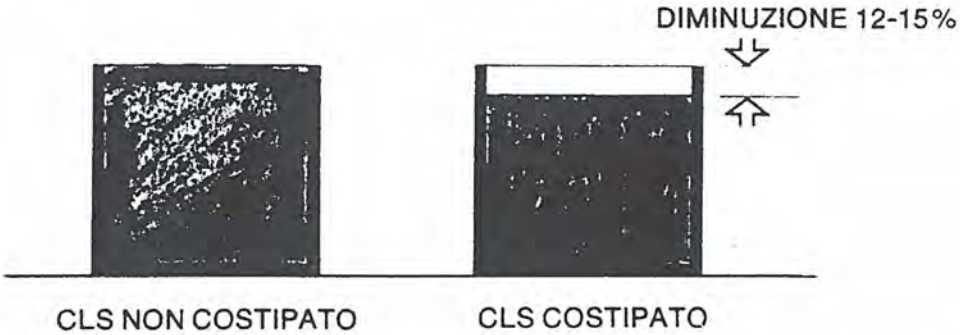


Figura 1. Diminuzione di volume del calcestruzzo con il costipamento

La compattazione può essere fatta a mano, con barre di ferro, oppure, normalmente, con mezzi meccanici. La costipazione a mano richiede ovviamente una maggior lavorabilità dell'impasto. Tra i mezzi meccanici il più diffuso è la vibrazione, che può essere interna (vibratori immersi nell'impasto, figura 2) oppure esterna (trasmessa attraverso le casseforme), come avviene generalmente nel caso della prefabbricazione. I vibratori ad immersione (o ad ago) possono essere ad aria compressa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 259 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 261 di 324

Ovviamente, si ricorda che una operazione di costipazione ben condotta, provocando l'eliminazione di gran parte dell'aria intrappolata contribuisce al raggiungimento di più elevate proprietà meccaniche: dalla Figura 3 si nota come la vibrazione meccanica è efficace anche su calcestruzzi poco lavorabili (bassi rapporti *a/c*), mentre quella manuale (pigiatura) diventa efficiente solo su calcestruzzi più fluidi. Una buona costipazione non potrà comunque mai sopperire alla caduta delle proprietà meccaniche che deriva dall'impiego di un rapporto *a/c* troppo elevato.

LEZ 24-05-2011

6. La stagionatura del calcestruzzo: la legge di Abrams

La **legge di Abrams** è di grande importanza tecnologica: la resistenza meccanica ad una determinata stagionatura ed ad una data temperatura aumenta al diminuire del rapporto a/c, secondo l'equazione:

$$R = K_1/K_2^{a/c}$$

Ove R = resistenza meccanica a compressione, K_1 e K_2 due costanti che dipendono dal tempo e dalla temperatura di stagionatura, oltre che dal tipo di cemento.

LEZ. 24-05-2011

7. Grado di compattazione

Per quantificare a posteriori il cosiddetto grado di compattazione (g_c) di un cls gettato si può ricorrere semplicemente alla misura della massa volumica (peso specifico o densità) di una carota estratta dalla struttura (m_v) ed al suo raffronto con quella (m_0) del corrispondente cls compattato "a rifiuto" (cioè fino a costipazione del 100%), valutata su un provimo (cubico o cilindrico) confezionato *ad hoc* in corso d'opera:

$$g_c = m_v/m_0$$

Numericamente é ragionevole che la massa volumica di un cls costipato a rifiuto sia pari a 2300 kg/m^3. Pertanto se la massa volumica della nostra carota, prelevata dal manufatto indurito, è pari a 2250 kg/m^3, si ottiene un grado di compattazione pari a:

$$g_c = m_v/m_0 = 2250/2300 = 0.98$$

cioé si è pervenuti ad una compattazione pari al 98% del valore massimo ottenibile.

8. Le strutture armate e precompresse: cenni

La maggior parte del calcestruzzo è impiegato per strutture armate. Un esame del calcestruzzo armato non rientra negli scopi di questo corso, tuttavia si tratta di un classico esempio di materiale composito, nel quale si accoppiano sinergicamente le proprietà di due materiali: il calcestruzzo e l'acciaio. Il conglomerato cementizio ha

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 261 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 263 di 324

In pratica, quindi, se il valore di δ della centrale di betonaggio è pari a 5 MPa, a fronte di una richiesta del progettista di una R_{ck} = 25 MPa, occorre almeno garantire una R_{cm28} di (25 + 1,4 x 5) = 32 MPa.

A maggior garanzia della sicurezza dell'opera è richiesto anche che il minimo valore di resistenza meccanica ($R_{c\ min\ 28}$) tra tutti i provini testati soddisfi la disequazione:

$$R_{c\ min\ 28} \geq R_{ck} - 3{,}5 \text{ MPa}$$

Pertanto, data una R_{ck} = 25 MPa, nessun provino dovrà presentare una R_{c28} < 21,5 MPa.

Le relazioni:

$$R_{cm28} \geq R_{ck} + K\delta$$
$$R_{c\ min\ 28} \geq R_{ck} - 3{,}5 \text{ MPa}$$

Sono raccomandate per lavori molto importanti, di grande impegno volumetrico (> 1500 m3 di cls) ed il tipo di controllo che esse effettuano sulla qualità del cls è detto **controllo di tipo B**.

Per lavori meno importanti, si adotta il cosiddetto **controllo di tipo A**, per il quale invece dev'essere rispettata la disequazione:

$$R_{cm28} \geq R_{ck} + 3{,}5 \text{ MPa}$$

cioè si assume forfettariamente un valore di $K\delta$ pari a 3,5 MPa, fermo restando l'altro requisito:

$$R_{c\ min\ 28} \geq R_{ck} - 3{,}5 \text{ MPa}$$

Per completare il quadro delle correlazioni, si ricorda quella che unisce la resistenza a compressione (R_c), o anche la resistenza caratteristica R_{ck}, al modulo elastico:

$$E = K_E\,(R_c)^{1/2}$$

ove K_E é una costante che dipende dale condizioni di misura.

Per la normativa italiana, in assenza di misure dirette del modulo elastico E, esso è valutabile (a 28 gg) come pari a:

$$E_{28} = 5700\,(R_{ck})^{1/2}$$

LEZ. 24-05-2011

10. L'effetto della temperatura sul cls: approfondimenti

Le prove meccaniche di riferimento (vedi paragrafo 9) vanno effettuate in condizioni termoigrometriche standard (20°C, U.R. (umidità relativa)≥95%), a causa della notevole influenza di temperatura ed umidità relativa sull'evoluzione delle proprietà del cls durante la stagionatura.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 263 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 265 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 31-05-2011

Filmati AITEC
associazione italiana tecnico-economica per il cemento

1° FILMATO sul calcestruzzo

PRATICA DEL CLS:

- CEMENTO
- AGGREGATI: posti in scompartimenti separati da robuste paratie
- DOSAGGIO E MESCOLAMENTO (batching & mixing): stare attenti alla quantità di acqua da utilizzare (ci potrebbe essere umidità negli aggregati!!!)

TIPI DI MESCOLATRICI: Mescolatrice a caduta libera (quella che ha lo zio a casa): ci vogliono 2 minuti di mescolamento. È costituita da tamburo rotante con all'interno lame che facilitano il mescolamento. Invertendo il senso di rotazione, le lame "gialle" facilitano la fuoriuscita del cls.

Mescolatrice a piatto: utili quando la miscela deve essere asciutta e compatta. Riduce i tempi di miscelazione fino a mezzo minuto.

Mescolatrice per cls preconfezionato

Le mescolatrici devono essere accuratamente lavate internamente ed esternamente dopo l'uso.

- CASSEFORME (formwork): in legno, plastica, acciaio
  - acciaio: X numero elevato di reimpieghi
  - plastica: X effetti speciali!
- ARMATURA (reinforcement): fissata rigidamente (con fili di ferro) per poter far sì che ci sia una corretta messa in opera.

(forse dal cassero)

tablette in plastica: per distanziare le armature

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 265 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 267 di 324

PRETENSIONE e POST TENSIONE

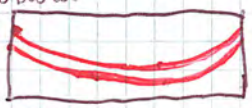
i cavi sono già tesi prima della posa in opera del cls

altro metodo di precompressione

è una tecnica di prefabbricazione (quella vista nel cantiere dello zio!)

- prima di gettare metto i trefoli di ferro e li tendo; poi posso fissare le staffe; poi getto il cls (basso rapporto $\frac{a}{c}$); poi lo costipo; quando il getto ha acquisito una certa resistenza i cavi vengono allentati gradualmente; infine dopo il disarmo i cavi vengono tagliati.

guaina di plastica messa all'interno dell'armatura



e all'interno di essa ci metto il cavo.

Dopo la posa del cls i cavi vengono tesi con un martinetto.

La guaina non viene tolta, ma riempita con pasta di cemento

La scelta tra pre-tensione e post-tensione è dovuta ai costi e al tipo di opera da realizzare.

3° FILMATO sulla durabilità (IL DEGRADO DEL CLS)

titolo del filmato

[Il collante, cioè la pasta cementizia è una miscela di acqua e cemento]

Se metto troppa acqua ⇒ pori
Se metto meno acqua ⇒ facilito l'adesione tra i grani

Diminuire il più possibile l'acqua d'impasto è la REGOLA FONDAMENTALE.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 267 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 269 di 324

Abbiamo dunque visto che i due composti che sono "complici" dei solfati sono:

$Ca(OH)_2$: portlandite
C-A-H : alluminati di calcio idrati

⇒ i cls con minori quantità di tali composti saranno meno soggetti ad aggressione solfatica.

i CEMENTI DI MISCELA (pozzolanico e d'alto forno) ci permettono di:

- sostituire il Portland con aggiunte minerali che non contengono o contengono molto limitatamente alluminati di calcio
- la pozzolana reagisce con $Ca(OH)_2$ e la loppa basica ne ha bisogno poco di $Ca(OH)_2$ (infatti possiamo ridurre a solo 5% l'apporto di Portland)

da qui si deduce che i cementi di miscela sono molto meno soggetti all'aggressione solfatica rispetto al cemento Portland

PAG. 153

AGGRESSIONE DA CLORURI NEL CLS INDURITO

Origine Cloruri: acqua di mare (aerosol marino), sali disgelanti (deicing salts: $NaCl$, $CaCl_2$)

nel nostro territorio non sono frequenti (cioè non agiscono contemporaneamente); nei territori a climi freddi (Grecia, Finlandia...) l'è compresenza di acqua di mare e uso di sali disgelanti (perché appunto è molto freddo)

fine dispersione di piccolissime goccioline di acqua marina che vengono trasportate dai venti e possono arrivare ad interessare anche manufatti posti a parecchi Km di distanza dal mare!

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 269 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 271 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 01-06-2011

IL DEGRADO DEL CLS INDURITO PAG. 150

cioè dell'opera già posta in esercizio quindi il cls è monolitico e c'è già stato sviluppo delle proprietà meccaniche.

TAB. 7.2: è il risultato di uno studio di 139 strutture

TAB. 7.3

Cause di degrado di tipo < chimico, fisico, meccanico

Il degrado si manifesta abbastanza lentamente nel tempo e si manifesta innanzitutto se il cls è stato malrealizzato.
Man mano che il degrado procede, i costi aumentano in maniera esponenziale.

Se il cls è poroso, ma con porosità chiusa (pori isolati e non interconnessi tra loro e con l'esterno) ⇒ gli aggressivi non riescono ad entrare.

AGGRESSIONE SOLFATICA DEL CLS INDURITO PAG. 152

FIG. 7.8. impregnano il campione di cls indurito con acqua

è l'aggressione più dannosa, più pericolosa, più grave (quella più comune è invece quella di carbonatazione (CO_2))

Se l'acqua contiene presenza di solfati ⇒ forte espansione
I solfati possono derivare da acque (soprattutto del sottosuolo, di falda) che, tramite risalita capillare, risalgono fino al manufatto; possono derivare anche da terreni.

FASE 1: $\underbrace{\text{Portlandite}}_{\text{generata dall'idratazione dei silicati di calcio}} + \underbrace{\text{solfati}}_{\text{catturano gli ioni calcio della portlandite}} \rightarrow \text{GESSO}$: $Ca^{++} + SO_4^{=} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$

tale reazione è espansiva: la reaz. di formazione del gesso è (ricordiamo) espansiva.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 271 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 273 di 324

AGGRESSIONE DA PARTE DELL'ACQUA DI MARE

(contiene cloruri e solfati (e ioni magnesio))

FIG. 7.10 PAG. 154

Anche gli ioni magnesio possono reagire con il CSH portando ad una decalcificazione del silicato di calcio idrato:

$$Mg^{2+} + CSH \rightarrow \text{silice amorfa} + \underbrace{\text{brucite } Mg(OH)_2}_{\text{è un composto incoerente; non dà apporto al mantenimento di prestazioni meccaniche}}$$

L'aerosol marino produce gli stessi effetti: l'unica differenza è il tempo.

FIGURA PROIETTATA:

Dopo 25 anni d'esposizione all'acqua di mare valutiamo il residuo integro (cioè la percentuale di cls ancora integro). Se il cls è ben preparato (no porosità) ⇒ indipendentemente dal tipo di cemento utilizzato, dopo 25 anni la percentuale di cls ancora integro è molto alta e simile per tutti i tipi di cemento utilizzato.

Non mano che diminuiamo il quantitativo di cemento (⇒ aumenta a/c) ⇒ si nota la differenza nell'usare cemento Portland o cementi di miscela (i cementi di miscela presentano un residuo integro maggiore rispetto a quello del cemento Portland dopo 25 anni)

CARBONATAZIONE DEL CLS INDURITO

PAG. 155

Bisogna fare un distinguo:

- degrado dovuto a CO_2 gassosa (cioè CO_2 presente in atmosfera)
- " " CO_2 disciolta in H_2O pura (è molto meno frequente del primo caso, si verifica ad esempio per dighe, muretti di contenimento per terreni in zone di montagna ⇒ ho acqua contenente pochi sali ma con elevato grado di purezza)

Analizziamo per primo il caso + generale: il 1° (cioè CO_2 gassosa)

$$\boxed{CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O} \quad (1)$$

"sostituiamo portlandite con $CaCO_3$"

sembra una reaz. inutile, perché l'abbiamo sbruciato per ottenere il legante calce; in realtà

Non devo usare H_2CO_3 perché l'acqua del CO_2 è volta per acqua

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 273 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 275 di 324

FIG. 7.11

[5 cm interessa già la zona del copriferro]

FIG. 7.12

Il trasferimento di CO_2 è dovuto alla quantità di acqua fisicamente adsorbita presente sulla superficie dei pori e tale quantità di acqua dipende dall' U.R. ambientale

→ zona di pessimum: per U.R. < 50% ⇒ film di condensa non continuo ⇒ non c'è trasporto continuo di CO_2

tra circa 50% e 90%

per 50% < U.R. < 90% ⇒

per U.R. > 90% ⇒ i pori sono pieni di acqua ⇒ la troppa acqua limita i movimenti relativi per il trasporto di CO_2

l'acqua della superficie con difficoltà riesce ad arrivare sino al nucleo a causa della pienezza dei pori d'acqua

DOPO AVER CHIESTO UN CHIARIMENTO ALLA PROF.:

Ho CO_2 nell'atmosfera (aria)

1 se U.R. è bassa (es: nei climi secchi); la CO_2 rimane sulla superficie del manufatto perché manca il veicolo che la trasporti nel cuore del manufatto

2 se U.R. del getto è elevata (cioè 50% < U.R. < 90%) ⇒ avrò acqua di condensa (acqua fisicamente adsorbita) nel materiale che veicola la CO_2.

N.B. Sia nel caso 1 che 2 la prerogativa base affinché ci sia carbonatazione è che ci siano pori ⇒ cls mal realizzato. Se infatti il cls è ben realizzato ⇒ non ci sono problemi

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 275 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 277 di 324

Grazie a questo indicatore di pH posso rilevare quanto vale la profondità di carbonatazione.

PAG. 158

DEGRADO DELLA CO_2 SCIOLTA IN ACQUE MOLTO PURE

Ricordiamo che l'acqua è un solvente polare tra i migliori che conosciamo ed è estremamente efficace e il suo potere di solubilizzare le altre sostanze è tanto più elevato quanto più è alto il suo grado di purezza.

Le acque di sorgente ad es. hanno un potere solvente molto elevato. L'acqua molto pura solubilizza la CO_2 dell'atmosfera e forma una soluzione acquosa di H_2CO_3 e questa sol. acquosa è quella che interessa il cls indurito.

$$CO_2 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3$$

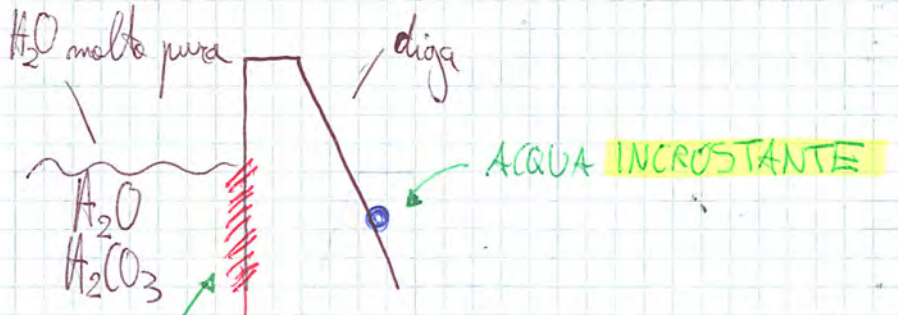
bicarbonato di calcio

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longleftrightarrow Ca(HCO_3)_2 \quad (1)$$

si tratta di un vero e proprio equilibrio (si può spostare a destra o a sinistra a seconda del quantitativo di CO_2 presente)

Rispetto a prima, ora si ha formazione di un sale molto più solubile del $CaCO_3$, cioè il $Ca(HCO_3)_2$ che a sua volta può essere ancora solubilizzato.

Es:



da questa parte l'ACQUA si dice AGGRESSIVA

perdita di materia dovuta alla solubilizzazione del $Ca(HCO_3)_2$. Continuando la solubilizzazione aumenta la porosità del manufatto ⇒

⇒ si arriva quindi alla superf. della diga esposta all'aria ⇒ ho evaporazione dell'acqua ricca di CO_2, quindi l'equilibrio (1) si sposta verso sinistra, cioè verso il carbonato di calcio $CaCO_3$ che quindi si

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 277 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 279 di 324

$CO_{2\,g} \xrightarrow[\text{poi contenuta}]{H_2O} CO_{2\,(aq)}$

CO_2 acquosa, cioè in soluzione acquosa

vuol dire sostanzialmente $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$

Carbonatazione della calce aerea! Non mi fa perdere resistenza della parte di cemento, l'unica problema è fa

Poi: $CO_{2(aq)} + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

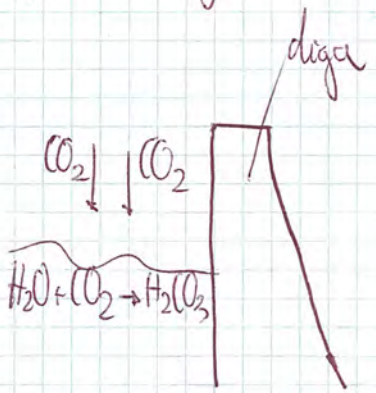
PORTLANDITE
CH

CONSEGUENZE: salificazione: cioè io progressivamente neutralizzo la portlandite ⇒ il pH scende ⇒ questo mi fa perdere la passivazione dei ferri d'armatura ⇒ degrado corrosivo dei ferri.

Se ho pH ~ 7 ⇒ salificazione totale

L'acqua molto pura è anche di solubilizzare, cioè ha un POTERE SOLVENTE molto elevato.
Un'acqua già molto carica di sali, più di tanto non può sciogliere ⇒ se aggiungo sale ⇒ precipitazione

Ho ho:



La $[CO_2]$ gassosa dell'atmosfera può essere sciolta, solubilizzata in un acqua pura. (Un'acqua molto pura, se a contatto con CO_2, tende subito a solubilizzarla)
La CO_2 si scioglie in acqua e dà origine a H_2CO_3.

$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$

questo primo step è uguale in tutti e due i casi; ora però ci sarà uno step successivo

A questo punto l'H_2CO_3 fa:

(1) $H_2CO_3 + CH \rightarrow CaCO_3$

Il carbonato di calcio continua però ad

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 279 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 281 di 324

⇒ la permeabilità cresce ⇒ la soluzione acquosa ricca di bicarbonato, può arrivare dall'altra parte, a contatto con l'aria ⇒ parte dell'acqua evapora ⇒ l'equilibrio (1) si sposta a sinistra (per Le Chatelier):

e quindi c'è produzione di $CaCO_3$ che è molto meno solubile e quindi precipita come efflorescenza.

Nella prima fase l'acqua si dice AGGRESSIVA perché solubilizza, e aggredisce il cls indurito rendendolo più permeabile: DILAVAMENTO

Nell'ultima fase si dice INCROSTANTE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 281 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 283 di 324

SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI 07-06-2011

Guardando un manufatto io posso già dire a che tipo di degrado è soggetto:

Se ho manufatti alti ⇒ avrò degrado da carbonatazione, perché non posso avere risalita capillare fino a grandi altezze

Se ho fessure parallele alle armature ⇒ ho sicuramente carbonatazione

Se invece ho una fitta rete di fessure, quasi una ragnatela di fessure, cioè intrecci di fessure, con punti in cui si vedono dei sollevamenti ⇒ REAZIONE ALCALI-AGGREGATO PAG. 159

ALCALI: Na^+ e K^+

AGGREGATO: aggregati reattivi (cioè reattivi nei confronti degli alcali)

amorfa = opale (la silice amorfa è molto reattiva)

SILICE REATTIVA CIRCONDATA DA UN ALONE DI SILICATO IDRATO SODICO: silicato di sodio idrato.

Gli ioni sodio e potassio sono già presenti nella polvere di cemento, poiché sono in quantità minimale nelle argille usate come materia prima per il clinker di cemento. Questa quantità minimale può essere però sufficiente se si è in presenza di aggregati che non sono inerti, ma reattivi.

Na^+ può essere inoltre trasportato da aerosol marino e da acque di mare, o da acque sotterranee che lambiscono sodio.

Questa silice reattiva reagisce con gli alcali per dare vita a dei SILICATI ALCALINI IDRATI che sono espansivi

occupano un volume maggiore dell'aggregato da cui si è generato.

Nei manufatti, dove è presente l'aggregato che reagisce avrò piccoli

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 283 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 285 di 324

l'acqua nelle nuove fessure ⇒ propagazione del degrado ad ogni ciclo.

DIAGNOSI: la prima parte danneggiata è la superficie del manufatto, perché quella più esposta alle variazioni termiche (il cls è un composto ceramico ⇒ bassa conducibilità termica ⇒ le variazioni di temperatura non arrivano al nucleo).

ESFOGLIAZIONE: il cls esfoglia, cioè porzioni sottili di cls (come dei fogli), si fessurano, perdono consistenza e si staccano e cadono a terra (e possiamo raccogliere tutti i prodotti dell'esfogliazione ai piedi del manufatto !!!!!).

Poiché si staccano queste parti ⇒ la parte sottostante del getto sarà la nuova porzione corticale ⇒ si staccherà questo secondo foglio e così via ⇒ il fenomeno procederà così dalla superficie verso il cuore del manufatto.

RUOLO DEGLI ADDITIVI AERANTI: FIG. 17.18: l'additivo aerante viene aggiunto nell'impasto fresco, perché quando il cls fa presa e indurisce, l'aerante crea delle bolle d'aria che sono cavità, pori isolati (non comunicanti tra loro) e si ottengono con un'aggiunta minima di aeranti (0,02 - 0,05% in massa rispetto al cemento).

Queste bolle arrivano a contatto con le fessure e agiscono da camera di espansione (cioè un vuoto in cui ospitare l'espansione) per l'acqua presente nelle fessure ⇒ l'espansione avviene nella bolla e non va ad intasare il cls ⇒ no produzione di cricche ulteriori.

I pori (unità e decimi di μm) sono molto più piccoli delle microbolle d'aria.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 285 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 287 di 324

un effetto di contrazione che raggiunge il suo max intorno ai 450° C.

DECOMPOSIZIONE TERMICA

Dai 150°C ai 450° avviene questo: le fasi idrate presenti nella pasta di cemento indurita si stanno decomponendo termicamente (soprattutto il silicato di calcio idrato CSH che è quello che dà la resistenza).

A 450° tutti i prodotti che erano idrati sono ora anidri, e quindi al riscaldamento ulteriore ricominciano a dilatare.

Il cls può non ancora collassare perché c'è ancora un 75% in volume di scheletro rigido: aggregati che non sono più tenuti insieme da legante ma riescono comunque ancora a garantire buona continuità strutturale.

L'aggregato silicico SiO_2 CRISTALLINA (QUARZITI) ha $T_{fusione} = 1710°C$. Il problema però è un altro: a circa 600° c'è una transizione cristallografica del quarzo da β a α (è un processo reversibile) (cioè se raffreddiamo passiamo da α a β): il quarzo rimane un cristallo ma cambia la cella elementare: il cristallo passa da una struttura più compatta ad una meno compatta, dando vita nel giro di 1° C ad una dilatazione improvvisa (salto nella FIG. 7.19) di un ~ 17-10%.

Questa dilatazione si manifesta in una pasta di cemento che ha già perso le sue capacità leganti.

L'aggregato di tipo CALCAREO (se si ha aggregato con presenza di $CaCO_3$ o di dolomite ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$: dolomia) ⇒ ad una temperatura di circa 850°-950°, questi aggregati decompongono termicamente → $CaO\ (MgO) + CO_2(g)$, cioè:

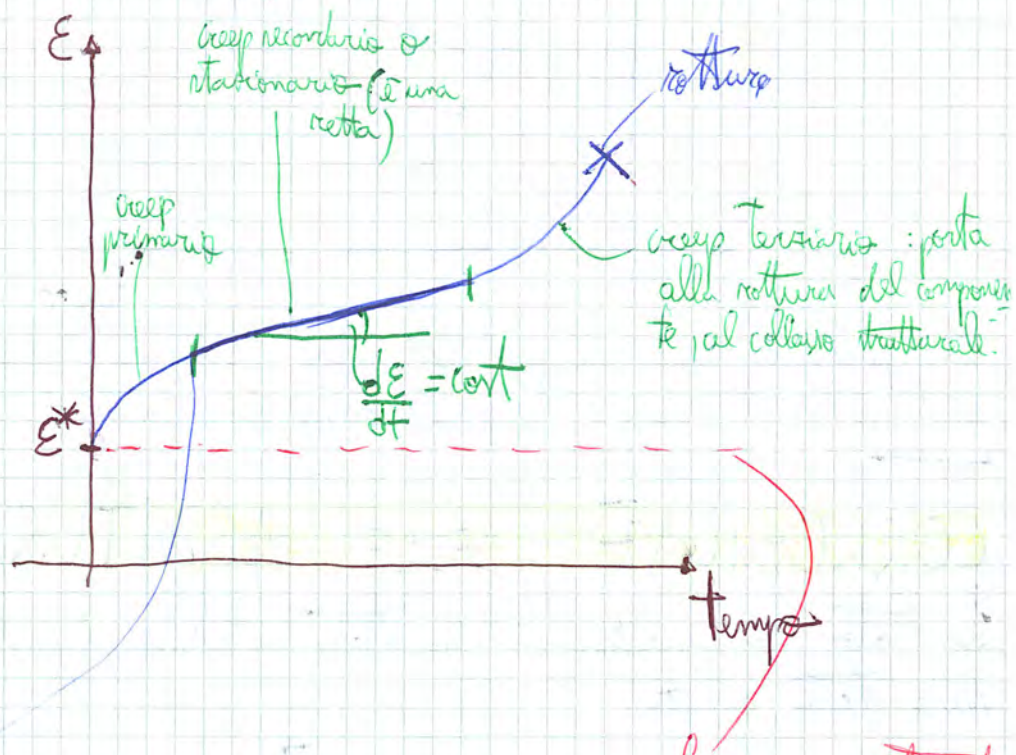
$$CaCO_3\ (o\ CaCO_3 \cdot MgCO_3) \xrightarrow{850°-950°} CaO\ (MgO) + CO_2\ (g)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 287 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 289 di 324

Se applico $\sigma^* < \sigma_{el}$ ⇒ non ho deformazione costante.

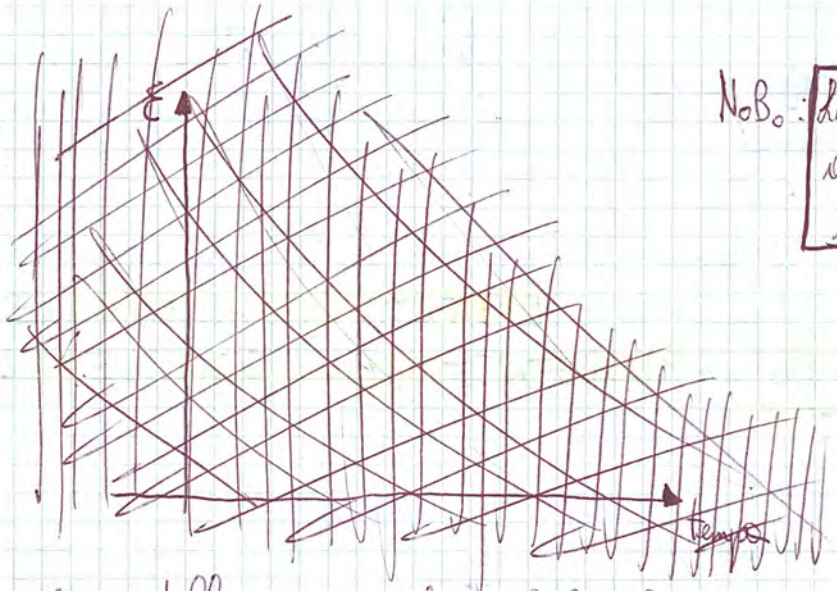
Per $\sigma^* < \sigma_e, \sigma_u$ (costante), se $T > 0{,}35 - 0{,}5\ T_f$ (in K) METALLO:



$\sigma^* = E\varepsilon^*$

la curva non ha andamento monotono ma posso distinguere tre porzioni nella curva

non ho un comportamento di questo tipo che curva ho a temp. basse



NoBo: [La deformazione è irreversibile, irrecuperabile]

Il creep dei metalli non è attribuibile solo a un moto dislocativo; ma è dovuto al fatto che intere parti di materiali si muovono sfruttando i bordi di grano come superfici di scivolamento ⇒ questo comporta deformazioni costanti nel tempo di tipo irreversibile, finché la

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 289 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 291 di 324

Il acciaio si corrode formando ruggine → è un ossido - idrossido di ferro.
→ è il sintomo finale della malattia

2 conseguenze:
- sostituzione del metallo (che ha alte resistenze meccaniche) con ruggine, che è incoerente ⇒ non ha alcuna caratteristica di resistenza
- riduzione della sezione portante

Vedremo ci deve essere differenza di pressione parziale (Δp) di ossigeno

Come si manifesta il fenomeno della corrosione? Noi abbiamo ferro che è esposto ad acqua e a ossigeno: si instaura il fenomeno detto PILA A CONCENTRAZIONE: ci sono zone della superficie metallica bagnate da quantità di ossigeno superiori rispetto ad altre zone della superficie.
La concentrazione di ossigeno sciolta nell'acqua è minore della concentrazione di ossigeno nell'aria e questa differenza di concentrazione crea la f.e.m. della pila.
QUINDI: la f.e.m. si crea perché parte del metallo è a contatto con aria e parte con goccia d'acqua.
In queste condizioni si crea una redox: l'anodo è rappresentato dal ferro a contatto con ossigeno che ha pressione parziale minore (quindi a contatto con l'acqua). La semireazione di tipo anodico è questa:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

La semireazione di tipo catodico è una riduzione ed è:

$$\underbrace{\tfrac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-}$$

interessa il metallo che è a contatto con l'aria: l'ossigeno dell'aria riduce il suo stato di ossidazione e affinché questo avvenga, l'ossigeno deve essere in presenza di acqua

Reazione redox Totale: $\tfrac{1}{2}O_2 + H_2O + Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2OH^-$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 291 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 293 di 324

COMBATTERE LA CORROSIONE

In fase di progetto:
- definire l'ambiente nel quale lavorerà il componente (come condizioni di T, pH, potere ossidante, $V_0 R_0$)
- scegliere accuratamente il materiale (la serie elettrochimica degli elementi ci dà la linea guida per scegliere quale materiale utilizzare) e inoltre il design ottimale del pezzo

In sede di produzione:
- realizzare con cura le giunzioni

In fase di esercizio:
- ispezione e manutenzione periodica

NoBo: bisogna evitare gli **accoppiamenti galvanici**, ossia accoppiare due metalli differenti che possono dare origine a REDOX (cioè a pila) senza che ci sia acqua o aria.
Si ha accoppiamento galvanico se uso metalli a nobiltà differente; es: rame - acciaio (es. chiodature di rame su elementi di acciaio)

contiene ferro che è meno nobile del rame

⇒ si sono usate chiodature in leghe di rame (es: bronzi)
(così evitiamo gli accoppiamenti galvanici)

Anche se lavoriamo bene, cioè le infiltrazioni d'acqua nelle zone di giunzione possono provocare l'instaurazione della pila ⇒ usare giunzioni di natura polimerica

Lamiere zincate: buona soluzione: lo zinco è meno nobile del ferro ⇒ si "sacrifica" al posto del ferro sottostante.
Se la zincatura dovesse subire un degrado così forte da scoprire l'acciaio sottostante, si crea una coppia

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 293 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 295 di 324

Come preserviamo però le armature immerse nel cls ??????????????
Finora abbiamo visto come preservare componenti metallici generici, ma come facciamo a preservarli se sono nel cls ????

ALCUNE LINEE GUIDA PER LA PREVENZIONE DELLA CORROSIONE DELLA STRUTTURA

- corretta progettazione strutturale e costruttiva (drenaggi ed eliminazione ristagni d'acqua ..)
- corretta scelta dei materiali e adeguata progettazione della miscela (Normativa)
- copriferro di spessore conforme alle condizioni ambientali
- messa in opera, compattazione e maturazione a "regola d'arte"

CONSEGUENZE STRUTTURALI DELLA CORROSIONE DELLE ARMATURE

- riduzione della sezione portante dei ferri (formazione ruggine) ⇒ diminuzione resistenze meccaniche
- fessurazione cls (perché la formazione della ruggine è una reazione di tipo espansivo) ⇒
  - pericolo di disancoraggio delle armature
  - aumento della velocità di corrosione
  - distacco del cls (soprattutto della porzione di copriferro).

PROTEZIONI AGGIUNTIVE:

- inibitori di corrosione: diminuiscono i potenziali redox dell'acciaio e quindi diminuiscono la sua possibilità di corrosione: sono aggiunti all'impasto fresco, perché devono miscelarsi bene
- trattamenti superficiali: pitture, membrane, trattamenti di impermeabilizzazione per impregnazione superficiale del cls; questi "additivi" superficiali sono di natura organica ⇒ a causa di un'evoluzione

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 295 di 324

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 297 di 324

PROTEZIONI AGGIUNTIVE:

- rivestimento delle armature con resine epossidiche
  Applicazione elettrostatica di un polimero, già pronto sotto forma di fini polveri, a 240°C circa su ferri sabbiati
  la sabbiatura garantisce che non ci sia ruggine presente

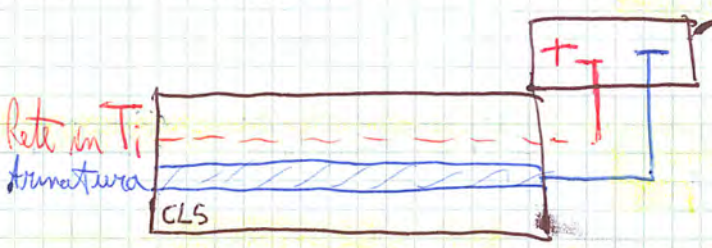
DIFETTO:
→ aderisce armatura - cls ridotta del 10-20%
perché la resina è un materiale polimerico che non ha grande aderisce con la parte di cemento
⇒ ho: acciaio ricoperto da resina epossidica e poi parte di cemento
⇒ aderisce armatura - cls ridotta

- zincatura delle armature
  solo per impiego in strutture che usino cementi a pH < 13 (altrimenti lo zinco viene asportato per fenomeni di tipo anfotero)
  ⇒ cementi di miscela: limitato tenore di CH libero.
  la usiamo nei

- acciaio inox:
  il cromo presente al suo interno forma sulla superficie dell'acciaio uno strato sottilissimo di ossido di cromo (Cr_2O_3) ⇒ il gradiente di concentrazione dell'ossigeno
  - costo elevato (perché c'è la presenza del cromo (≥ 11,5-12% in peso))
  - corrosione possibile:
    - formazione di carburi di cromo a bordo di grano (intergranulare): corrosione
      i carburi di cromo si formano preferenzialmente sui bordi di grano ⇒ la corrosione parte da lì.
    - ambienti fortemente ossidanti:
      $Cr(III) \rightarrow Cr(VI)$ (CrO_3 volatile)
      il cromo passa dallo stato di ossidazione 3 a 6 e si forma l'ossido CrO_3 che è volatile e quindi non è più protettivo.
      sottraggono cromo per la formazione di Cr_2O_3 ⇒ il cromo non si trova nelle quantità necessarie per formare il film protettivo

(legge di Fick) viene ad essere arrestata da questa specie (Cr_2O_3) fortemente ossidata.

- protezione catodica: applicata a solette, travi, pilone o altre strutture interessate da CORROSIONE DA CLORURI



Il titanio tendeva formare sulla sua superficie uno strato di ossido di titanio protettivo (TiO_2) che è protettivo e durevole

"DIFETTO": Il titanio è molto costoso.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 297 di 324