

Seminario

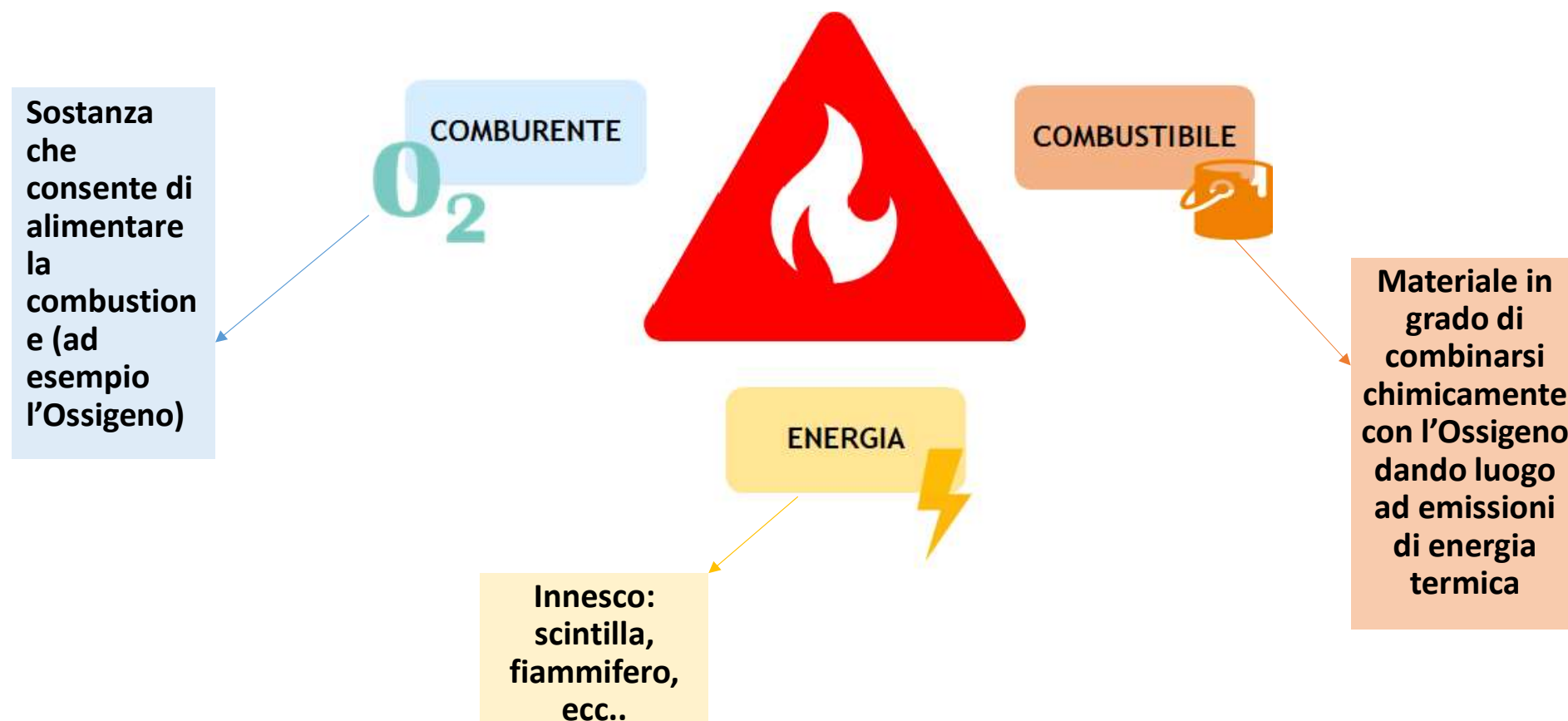
GLI EDIFICI PRODUTTIVI COLPITI DA INCENDIO



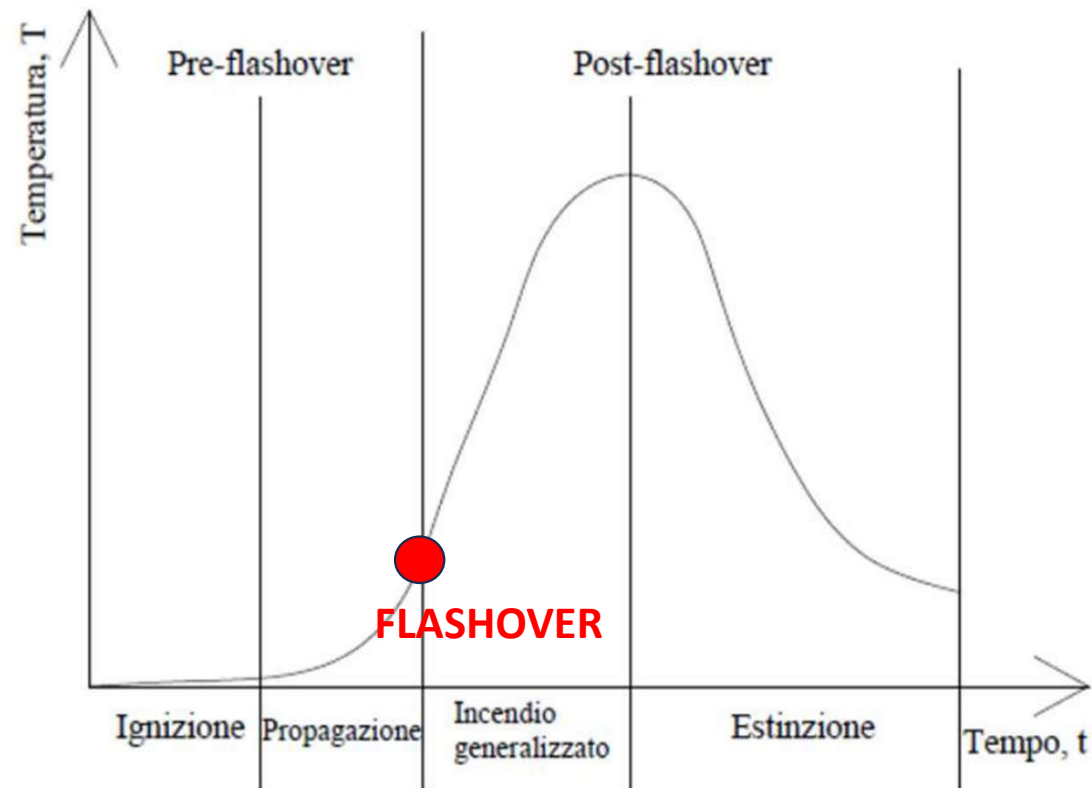
Ing. Turella Elisabetta
Direttore Lab. 1086 - Veneta Engineering
«Prove da eseguirsi su un edificio soggetto
a danni da incendio»

Verona, 29 giugno 2023

Fattori del fuoco



Come si sviluppa nel tempo



Fase di ignizione

Questo stadio inizia quando un oggetto combustibile viene posto a contatto stretto con una sorgente di calore anche modesta (piccola estensione, bassa emissione di calore, breve tempo).

Un fattore importante risulta essere il grado di infiammabilità dei materiali combustibili.

Tale stadio dipende dai seguenti fattori:

- infiammabilità del combustibile
- possibilità di propagazione della fiamma
- grado di partecipazione al fuoco del combustibile
- geometria e volume degli ambienti
- possibilità di dispersione del calore nel combustibile
- ventilazione dell'ambiente
- caratteristiche superficiali del combustibile.

Fase di propagazione – Pre Flashover

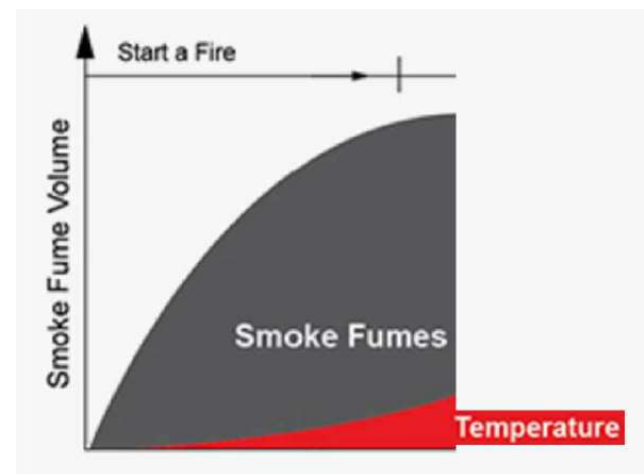
All'inizio l'incendio si propaga ad un oggetto adiacente, **le fiamme raggiungono il soffitto dove si accumulano gas e fumi caldi.**

La temperatura aumenta più rapidamente, ma non raggiunge valori tali da determinare l'ignizione spontanea delle superfici combustibili.

Con una adeguata ventilazione, l'incendio prosegue da oggetto a oggetto, mentre le fiamme e i gas caldi irradiano in tutte le direzioni energia termica che colpisce il pavimento e gli oggetti contenuti nel locale.

Tale stadio è caratterizzato da:

- produzione di gas tossici e corrosivi;
- riduzione della visibilità a causa dei fumi di combustione;
- aumento della partecipazione alla combustione dei combustibili solidi e liquidi;
- aumento rapido delle temperature;
- aumento delle energie di irraggiamento.

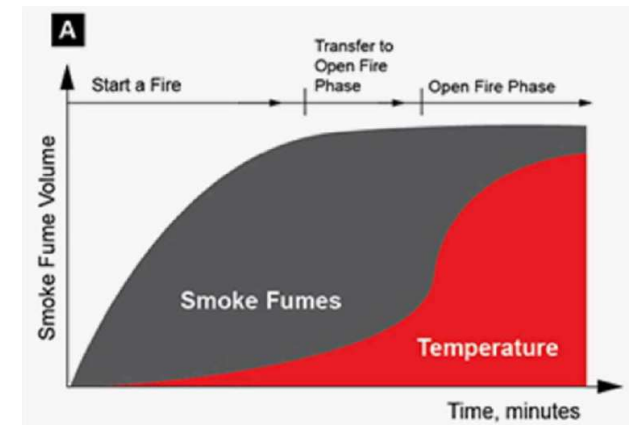


Flashover - incendio generalizzato

Punto di transizione da incendio in crescita a incendio con tutto il combustibile presente simultaneamente coinvolto.

Punto di inizio dell'incendio vero e proprio; rappresenta uno stadio irreversibile al di là del quale vi è scarsa possibilità che l'incendio si spenga da solo prima che il combustibile sia tutto esaurito.

- **propagazione rapida dell'incendio**, la maggior parte del **materiale combustibile prende fuoco per effetto del calore che riceve** o per irraggiamento o per convezione.
- **la temperatura media supera i 500°C**, e comincia ad essere uniforme in tutto l'ambiente
- **Quantità di calore elevato e sviluppo di fumi.**



Ultima fase - estinzione e raffreddamento

La temperatura dopo aver raggiunto il suo valore massimo comincia a diminuire più o meno rapidamente; ciò in relazione alla potenza termica ancora sviluppata dalla combustione dei residui dei materiali combustibili (in generale combustione senza fiamma) e quella residua delle strutture che delimitano il locale.

Il calore accumulatosi permane per tempi abbastanza lunghi e la sua restituzione avviene in relazione al salto termico fra la temperatura superficiale e quella dei gas all'interno del locale, alle caratteristiche termiche e, infine, alla ventilazione del locale.

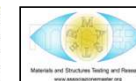
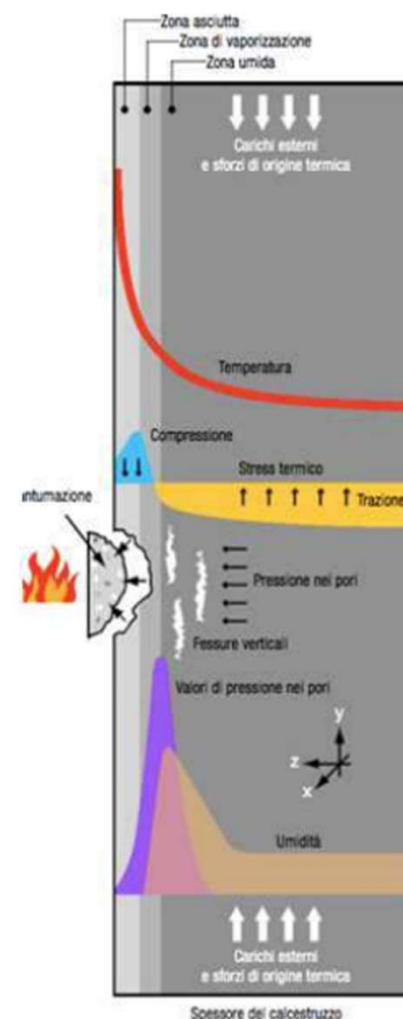
Questa fase non va trascurata perché ha effetto particolarmente importante nella distribuzione della temperatura della facciata compresa tra il piano incendiato e quello soprastante; una notevole potenza termica continua ad essere asportata coi fumi, a disperdersi per irradiazione attraverso le finestre, mentre l'afflusso di aria fresca abbassa notevolmente la temperatura media.

Questa fase termina quando la temperatura raggiunge valori inferiori ai 200° circa.

Schema di una struttura aggredita dal fuoco

Dall'esterno verso l'interno della parete soggetta a CARICHI ESTERNI + SFORZI ORIGINE TERMICA:

strato	caratteristiche	
1	asciutta	Zona esterna, Originariamente umida ma seccata subito
2	di vaporizzazione	Umida, a temperatura crescente in fase di cambiamento di stato; pressione crescente
3	umida	Allo stato naturale, con aumento di temperatura



CLS aggredito dal fuoco

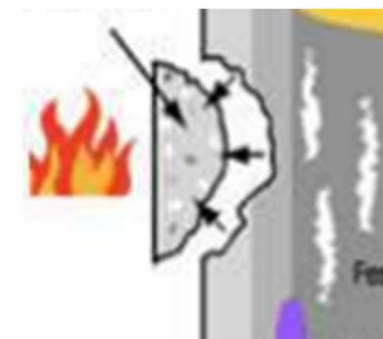
OLTRE I 100 °C si ha un progressivo aumento dello spessore interessato, con:

- Aumento della temperatura e della pressione di vapore;
- Aumento della temperatura nella pasta cementizia e negli aggregati, con sollecitazioni crescenti di compressione e di trazione (riequilibrio)
- Nascita di **micro-lesioni**: perpendicolari alla sollecitazione principale σ_1 di trazione, e quindi **fessure parallele alla superficie esterna**
- Rapidissimo rilascio di energia (distacchi repentini – **spalling esplosivo**) delle zone interessate

Se c'è presenza di armature lo **spalling** innesca due tipi principali di danno:

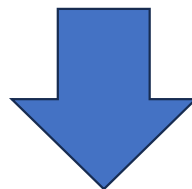
- 1) **riduzione dell'adesione tra ferro e calcestruzzo;**
- 2) **modifica delle caratteristiche delle barre di armatura**

Il fenomeno è di tipo ricorsivo: quindi la profondità del danno è funzione del tempo di esposizione



1) riduzione dell'adesione tra ferro e calcestruzzo:

Le barre vicino alla superficie (poco copriferro) subiscono **un aumento più rapido della loro temperatura** rispetto a quella del conglomerato data la molto maggiore conducibilità termica dell'acciaio (**30-50 kcal/mh°C**) rispetto a quella del calcestruzzo (**1,4-1,9 kcal/mh°C**);



Ne conseguono una **dilatazione differenziale** ed uno stato di tensione tra i due materiali con conseguente **spaccatura del copriferro e riduzione dell'aderenza**

La riduzione della capacità di aderenza acciaio-calcestruzzo **inficia soprattutto gli elementi in precompresso a cavi aderenti** (perchè la precompressione si trasmette al conglomerato grazie al meccanismo dell'aderenza)

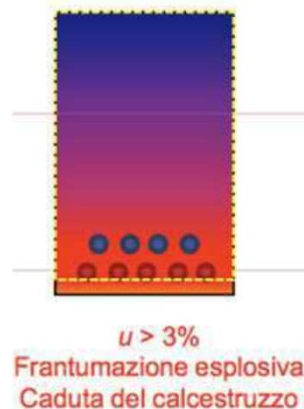
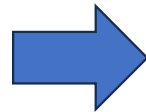
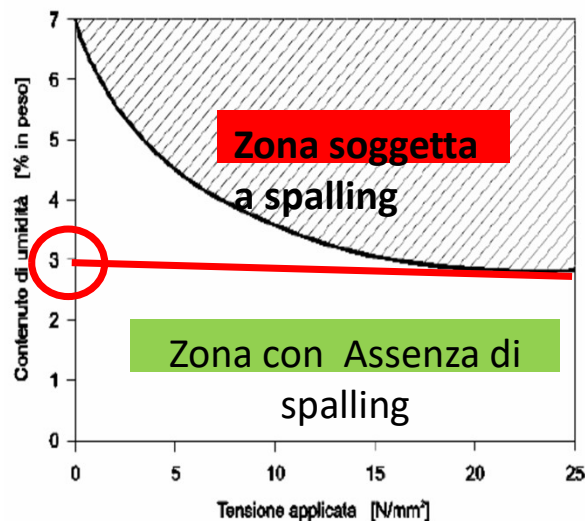
2) modifica delle caratteristiche delle barre di armatura:

A circa 500°C si situa il limite di capacità resistente per l'acciaio: una volta superata questa temperatura, **l'armatura non è più in grado di assorbire sforzi.**

3) la fase di raffreddamento può evidenziare una **frantumazione postra raffreddamento (post cooling spalling).**

Il danno, non violento, durante o dopo la fase di raffreddamento è legato all'assorbimento di umidità da parte del calcestruzzo

Il distacco del calcestruzzo (spalling) è **evitato/mitigato** con misure adeguate e tenuto in debito conto nella determinazione dei requisiti prestazionali (R e/o E I).



Fattori che **favoriscono** lo spalling sono:

- l'alto grado di umidità del calcestruzzo,
- il rapido incremento della temperatura,
- la snellezza dell'elemento
- l'elevato livello tensionale interno all'elemento.

Il calcestruzzo è formato da pasta cementizia, aggregati, acqua:

1. Nella pasta cementizia vi è una iniziale espansione del materiale dovuta all'aumento della temperatura
 2. la perdita di acqua provoca una modifica nella porosità della pasta cementizia, con suo conseguente ritiro
 3. => queste variazioni provocano tensioni maggiori della resistenza a trazione: FESSURAZIONI nella pasta cementizia con scollamento tra aggregati e pasta, ecc
 4. La pasta di cemento diventa termicamente meno conducibile alle alte temperature, ma le fessurazioni provocano una condizione più favorevole alla trasmissione del calore all'interno della struttura
- Aggregati con bassa conducibilità termica provocano minori sforzi di contrasto e quindi minori tensioni:
 - Aggregati calcarei presentano espansioni a circa 900°C quindi si possono considerare trascurabili nella complessità del fenomeno, mentre aggregati di Quarzo hanno trasformazioni intorno ai 550-570 °C: pericolosi in quanto amplificano il fenomeno di spalling!!
 - L'acqua (umidità) contenuta nella pasta di cemento, tende ad evaporare lentamente assorbendo calore: la temperatura del cls viene quindi mantenuta finché l'acqua non evapora,
 - Se la temp. sale in maniera brusca, l'acqua evapora aumentando la pressione che supera la resistenza a trazione del materiale: Spalling

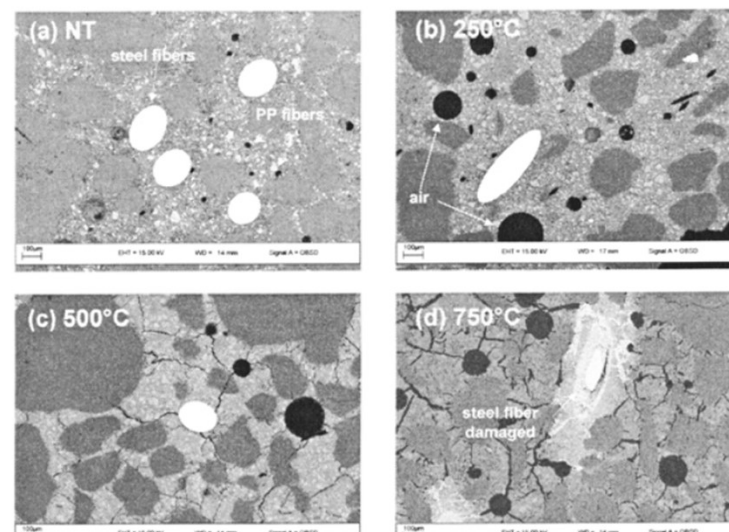
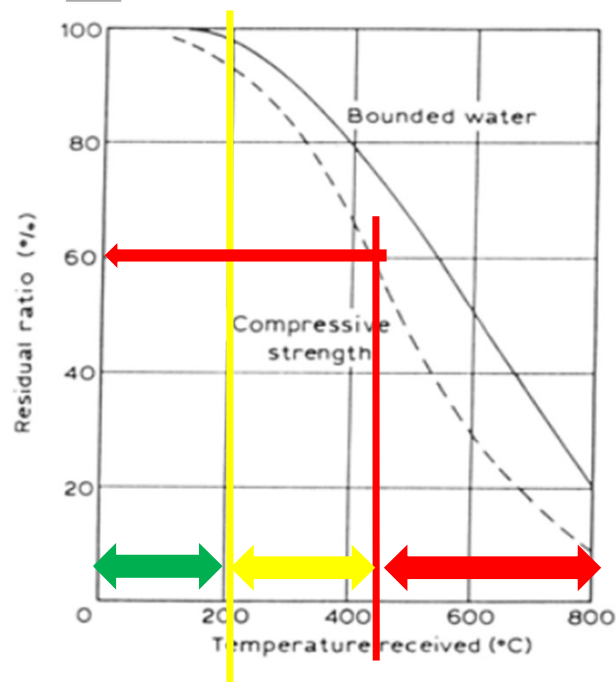
Cfr curva tratteggiata

Fino a 200 °C: ok,
resistenza quasi inalterata

A 400° l'idrossido di calcio Ca(OH)_2
inizia a disidratarsi e libera acqua
(vapore)

A 560° gli aggregati di quarzo
aumentano di volume (da α a β)

A 480°C :
la resistenza residua è 60% della
nativa



	Temperatura raggiunta °C						
	200	300	400	500	600	800	1000
Resistenza %	80	70	60	40	20	10	0
Modulo elastico %	60	50	40	30	10	5	0

Fino a 350-400
°C resistenza a
rottura quasi
integra

A 500 °C
resistenza a
rottura META'

A 700-800 °C
resistenza a
rottura nulla

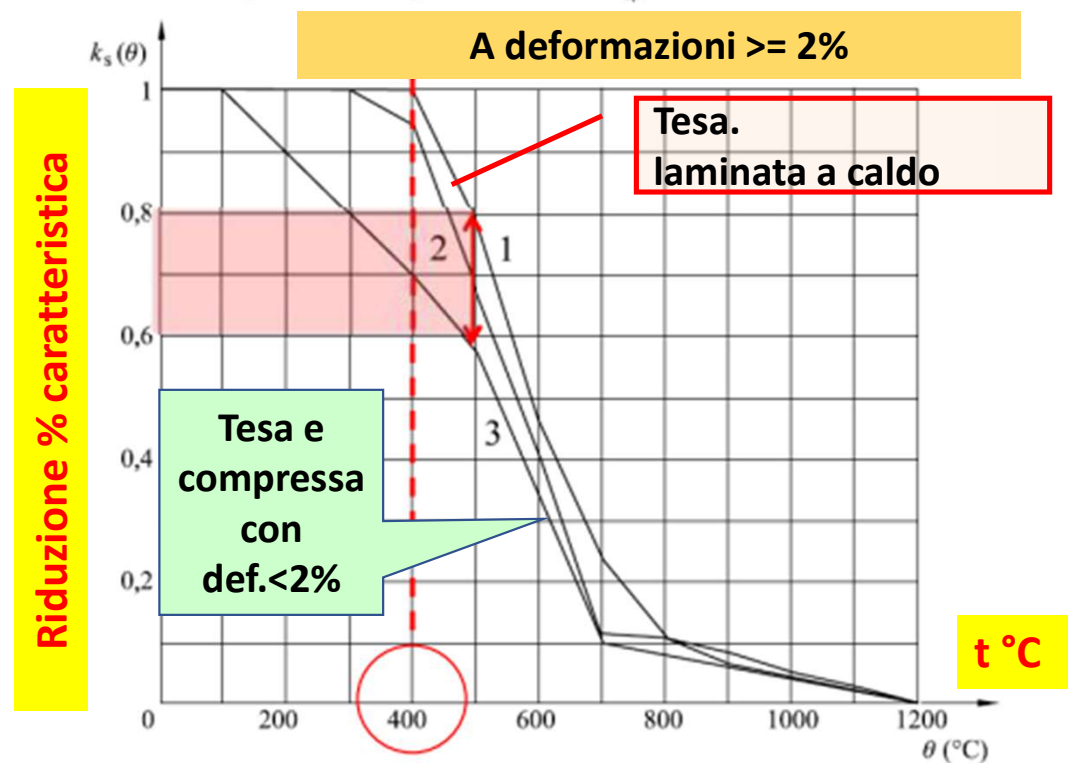
Coefficiente $k_s(\theta)$ per la valutazione della riduzione della resistenza caratteristica (f_{yk}) di armature tese e compresse

Legenda

Curva 1 Armatura tesa (laminata a caldo) per deformazioni $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$

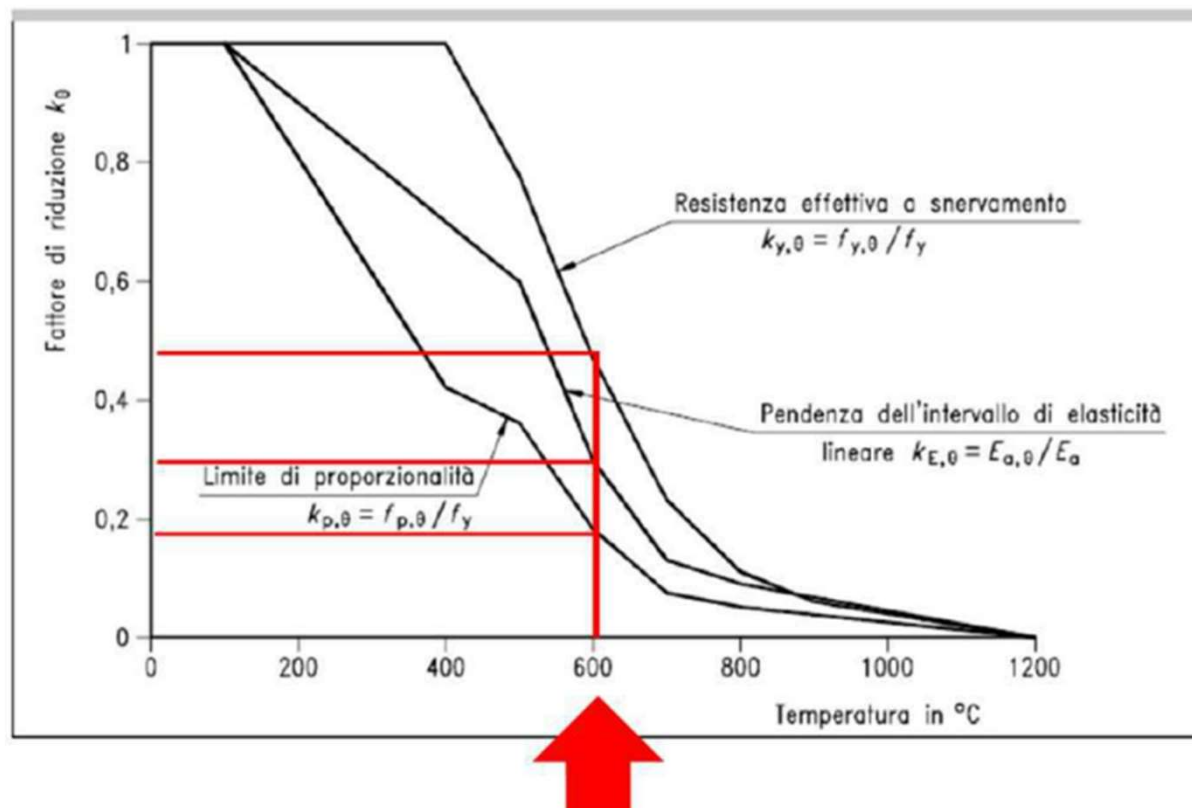
Curva 2 Armatura tesa (trafilata a freddo) per deformazioni $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$

Curva 3 Armatura compressa e tesa per deformazioni $\epsilon_{s,fi} < 2\%$



ACCIAIO: Riduzione della resistenza caratteristica in funzione della temperatura

A 600°C:
-R = 50%
-E = 30%



RIDUZIONE SNERVAMENTO, MODULO ELASTICO E LIMITE DI PROPORZIONALITA'

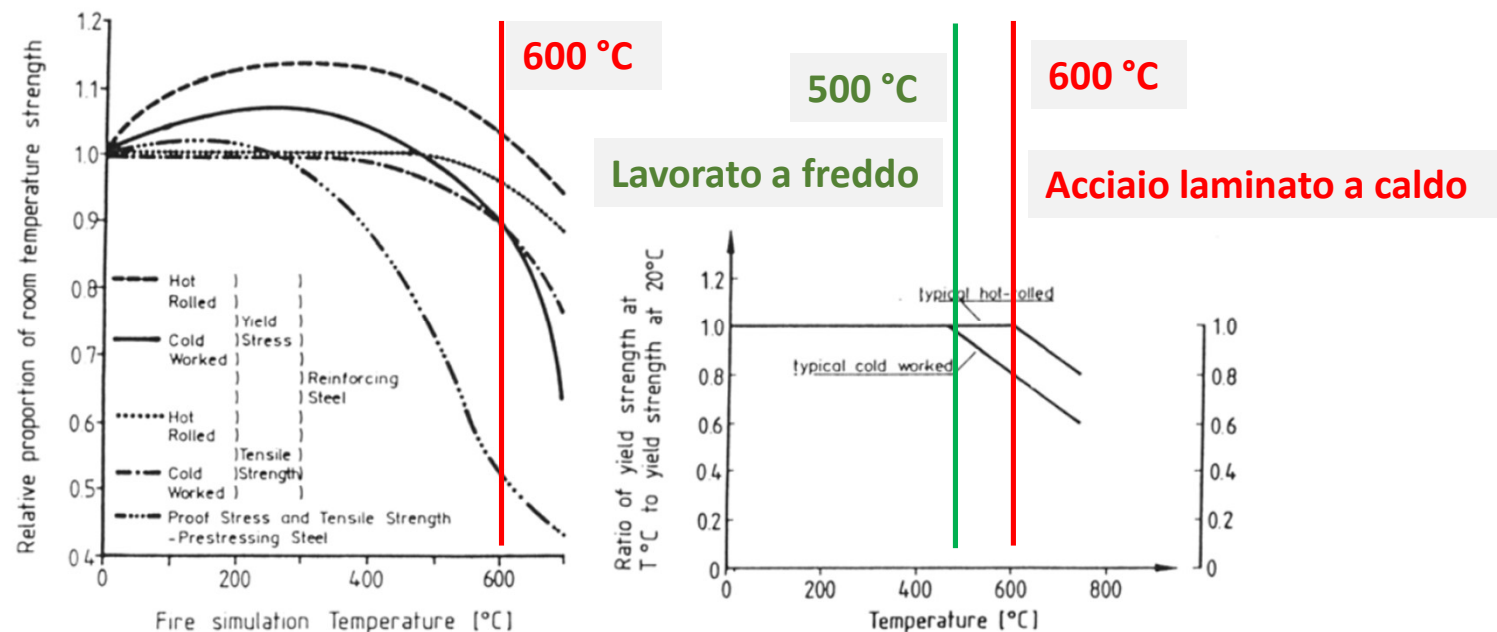
L'ACCIAIO per il C.A. ed il C.A.P.

Acciaio per c.a.

Durante il riscaldamento, fino a circa 600 – 700°C, non avvengono significative trasformazioni chimiche, pertanto dopo l'incendio normalmente recupera le sue qualità meccaniche iniziali.

Acciaio armonico

per esso il riscaldamento provoca la distensione dell'acciaio incrudito a freddo e quindi la perdita irreversibile delle iniziali qualità meccaniche (che erano elevatissima resistenza a rottura per trazione). È generalmente impiegato nella precompressione



La tensione di snervamento non ha riduzioni di resistenza residua fino a riscaldamento di 600 °C per l'acciaio normale ed a 500 °C per il lavorato a freddo.

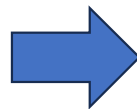
I **fumi** sono formati da **piccolissime particelle solide** (aerosol), **liquide** (nebbie o vapori condensati).

Le particelle solide sono sostanze incombuste che si formano quando la **combustione** avviene **in carenza di ossigeno** e vengono trascinate dai gas caldi prodotti dalla combustione stessa.

A seconda del materiale che brucia il colore del fumo cambia, ciò può facilitare il riconoscimento del combustibile.

Questo concetto, riassunto nella tabella sottostante, è usabile per determinare il combustibile, e quindi l'approccio da utilizzare per domare l'incendio

**scala cromatica dei
fumi per tipo di
combustibile**



Colore	Combustibile
Bianco	Fosforo, paglia
Giallo/marrone	Nitrocellulosa, polvere da sparo, acido nitrico, zolfo, acido solforico
Grigio/marrone	Carta, legno, stoffa
Marrone	Olio da cucina
Marrone/nero	Nafta, diluente per vernici
Nero	Benzina, carbone, catrame, plastica, cherosene, olio lubrificante
Viola	Iodio

SPIE PER LA VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA RAGGIUNTA

Elementi spia:

- I lucernari in metracilato rammolliscono a circa 130° - 200°
- Il bulbo delle lampadine rammolisce a circa 600°C
- I pannelli radianti in acciaio collassano a circa 700°-800°C
- Verniciature si danneggiano a 100° e sono distrutte a 150°C
- I tubi in gomma rammolliscono a 150° e si decompongono a 250°C

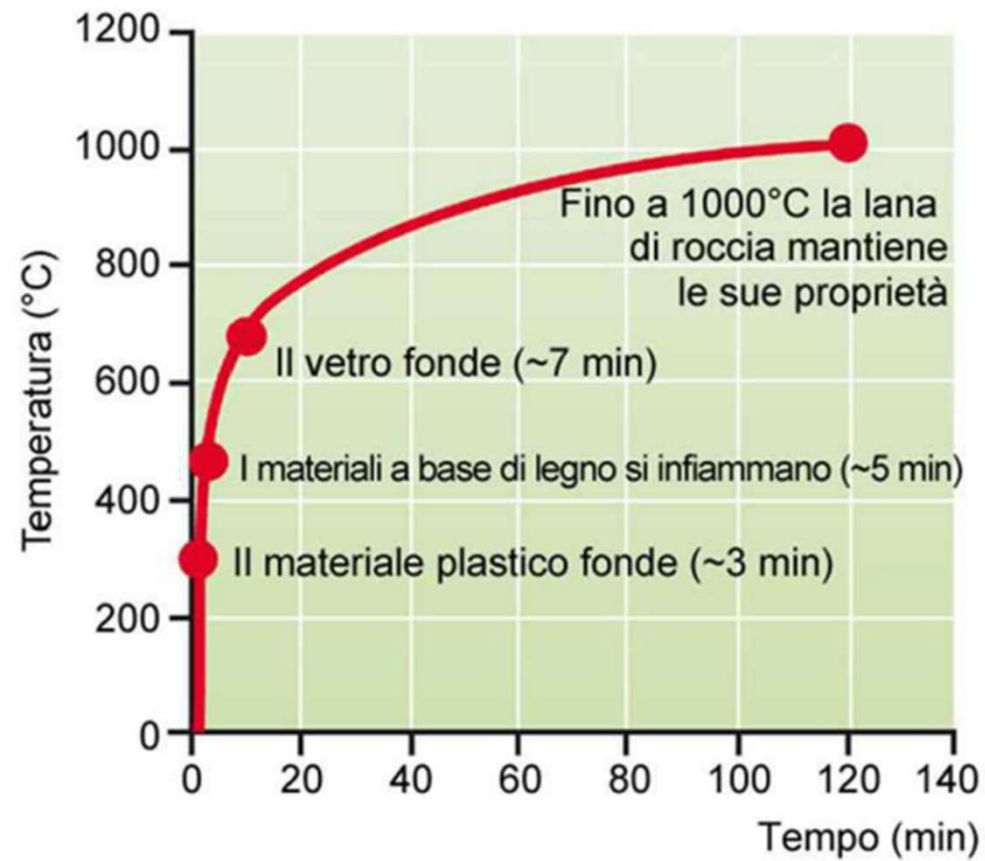


VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA RAGGIUNTA



Materiale	Esempi tipici	Condizioni	Temperatura indicativa (°C)
Poliammide (Nylon)	ancoranti, componenti elettronici e automobilistici	rammollisce fonde	180 260
Polimetil metacrilato	finestre, fari automobili, schermi, sanitari	rammollisce formazione bolle	130-200 250
Policarbonato	fari automobili, CD	rammollisce fonde	140 270
PVC	Cavi, tubazioni	degrada fuma annerisce carbonizza	100 150 200 400-500
Vetroresina	Scatole di derivazione, canaline elettriche, corpi illuminanti	rammollisce carbonizza	190-230 350-480
Saldature	Componenti elettrici e elettronici	fonde	180-190
Alluminio e le sue leghe	Corpi illuminanti, scambiatori, staffe, parti meccaniche	rammollisce fonde forma gocce	400 600 650
Vetro	finestre, lampade	rammollisce, spigoli arrotondati fluisce, viscoso	500-600 800
Vetro borosilicato	bulbo esterno delle lampade a scarica (vapori di mercurio, sodio)	rammollisce	800
Ottone	rubinetterie, ancoranti	fonde (specialmente ai bordi) forma gocce	900-1000 950-1050
Rame	cavi	fonde	1000-1100
Ghisa	Tubi, chiusini, griglie	fonde forma gocce	1100-1200 1150-1250
Bronzo	cuscinetti, giunzioni	bordi smussati forma gocce	900 900-1000
Vernici		deteriorano distrutte	100 250

LA VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA RAGGIUNTA



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Percorso di lavoro:

- 1) Individuazione tramite esame visivo di struttura integra e di quella potenzialmente ammalorata
- 2) prove (non distruttive, parzialmente distruttive) su elementi (della medesima struttura) che non abbiano subito il degrado termico
- 3) Calcolo della caratteristica indagata
- 4) **Campagna di prove nella zona in cui si intende individuare le proprietà meccaniche dei materiali degradati**
- 5) Confronto dei risultati per capire il degrado (o meno) delle caratteristiche di una struttura.

E' POSSIBILE E SICURO UTILIZZARE LA STRUTTURA???

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esame visivo



Esempi di strutture soggette ad incendio

Identificare lo scenario di incendio e permette di fare una prima classificazione dei livelli di danneggiamento andando ad indagare/interpretare i vari quadri fessurativi

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esame visivo



Esempi di strutture soggette ad incendio

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esame visivo

Esame visivo che ci permette di identificare lo scenario di incendio e permette di fare una prima classificazione dei livelli di danneggiamento andando ad indagare/interpretare i vari quadri fessurativi:

- Sfondellamento delle pignatte
- Distacchi all'intradosso
- Scartellamento di pareti
- Espulsione del calcestruzzo
- Distacco di scaglie longitudinali
- Fessurazioni
- Flessione degli orizzontamenti

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Per indagare il CLS:

Ultrasuoni
Sclerometro
Misura della carbonatazione
Pull-out
Carotaggi/microcarotaggi
Termografie
Analisi Difrattometriche

Possibili prove non distruttive e parzialmente distruttive

Per indagare l'acciaio da CA:

Prove di durezza (Leeb, Poldi, ecc)
Verifica di struttura cristallina (micrografia)

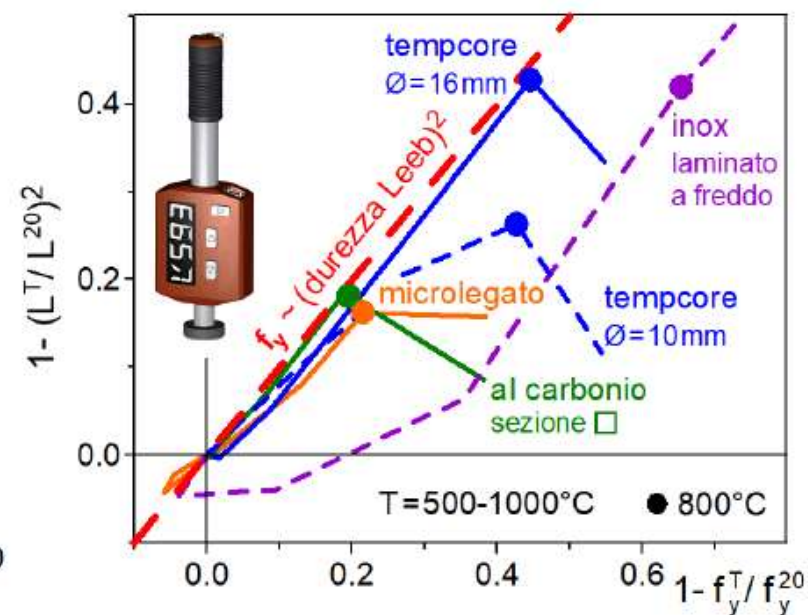
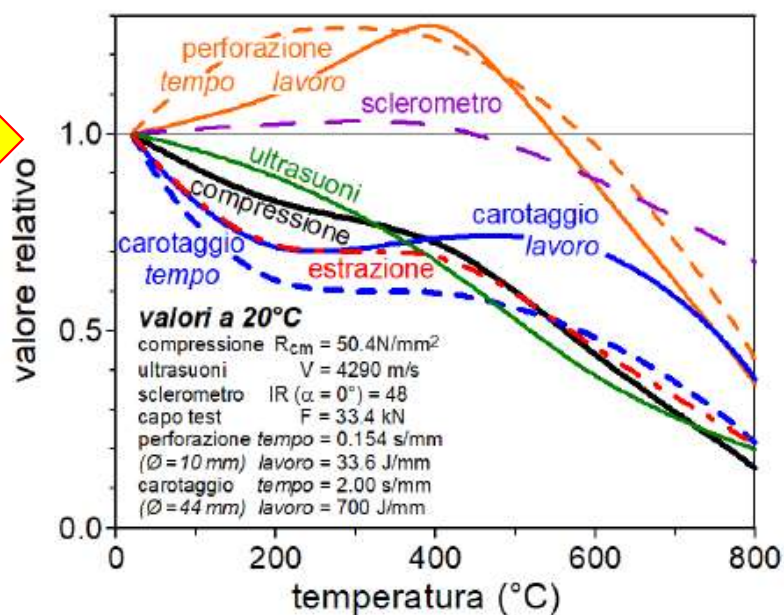
Per indagare l'acciaio da CAP:

Prove di carico (flessione, taglio)
Prove Dinamiche

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Valori relativi riscontrati con le varie tecniche in funzione della temperatura raggiunta

Valore allo stato integro



Sensibilità al danno termico di alcuni metodi per strutture in ca

Decadimento della durezza dinamica di diversi tipi di acciaio in funzione del calo della resistenza residua allo snervamento

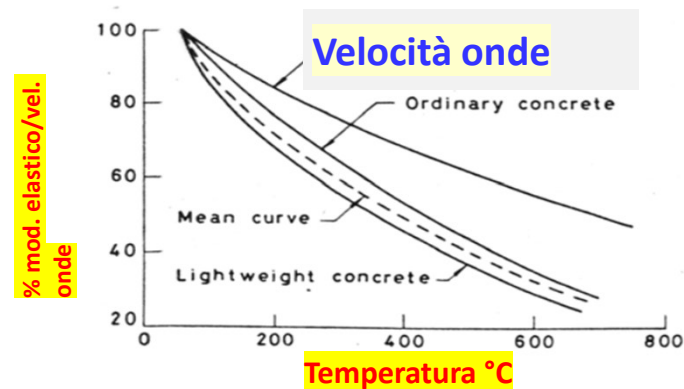
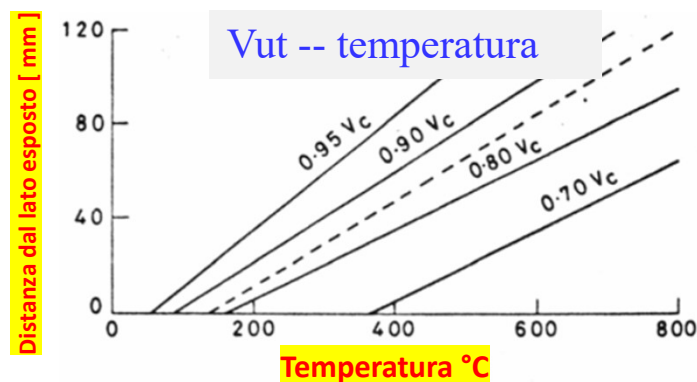
Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove ultrasoniche

La valutazione della resistenza del calcestruzzo mediante la tecnica degli ultrasuoni è nota.

Si misura la velocità di onde ultrasoniche emesse e ricevute a distanza costante su superfici contrapposte dell'elemento in calcestruzzo $V = D / t$

La resistenza meccanica ed il modulo elastico vengono calcolati mediante note formule.



ΔE e ΔV_{ut} in cls esposto a diverse temperature

l'esposizione ad alte temperature modifica sia la resistenza a compressione che il modulo elastico residui del calcestruzzo; noi li correliamo alla velocità degli ultrasuoni per le zone danneggiate e per la distanza dalla superficie esterna

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove ultrasoniche x Ed

Nell'ipotesi (e con i limiti) di materiale omogeneo, isotropo ed elastico lineare si possono usare le **prove ultrasoniche**, per le quali valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \\ V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \end{cases} \xrightarrow{\rho \text{ noto}} \begin{cases} E = \rho \frac{3V_p^2 V_s^2 - 4V_s^4}{V_p^2 - V_s^2} \\ \nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \end{cases}$$

misurando solo V_p

si determina $E_d = E_d(V_p, \rho, \nu)$

$$E = \rho V_p^2 \sqrt{\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}} = \rho V_p^2 f(\nu)$$

E_d è un modulo di elasticità di tipo dinamico trovato per mezzo di V_p ; ma a noi serve quello statico E (pendenza della curva sforzo-deformazione, nel ramo elastico).

$E_d = 1.2, 1.3 * E$ (=modulo elastico statico).

Da $E = E_d / (1.2, 1.3)$ si **risale alla temperatura massima** a cui l'elemento è stato assoggettato durante l'incendio.

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove ultrasoniche su cls

Le prove UT su cls soggetto ad incendio va eseguita con opportune cautele.
il calcestruzzo presenta una **bassa conducibilità termica e quindi trasmette poco il calore;**
la zona degradata risulta solo quella più esterna del materiale: ogni percorso pertanto contiene tratti di cls degradato e tratti di cls sano.

Il valore rilevato direttamente da una prova ultrasonica, risulta utile solo per le elaborazioni successive e va accompagnato da una dettagliata descrizione del percorso d'onda

L'individuazione delle due zone abbisogna di informazioni dedotte da prove su cls integro, speciali elaborazioni, letture relative a percorsi incrociati e qualche ipotesi semplificativa.

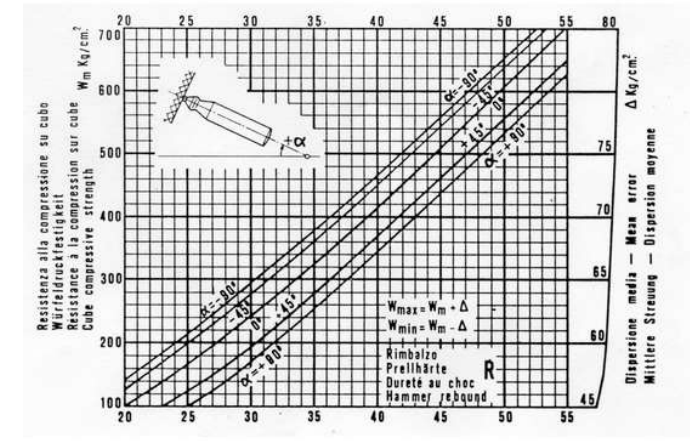
Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove sclerometrica

La prova consiste nel misurare l'altezza del rimbalzo di una massa convenzionale lanciata da una molla di rigidità nota, sempre con la stessa energia cinetica contro la superficie dell'elemento strutturale in esame.

Attenzione perché:

- 1) La prova è riferita allo strato superficiale della struttura, perciò se vi è presenza di spalling o fessurazione evidente non si deve eseguire
- 2) La correlazione fra rimbalzo e resistenza a compressione è falsata dallo sviluppo della carbonatazione (che causa un indurimento della superficie)
- 3) Non esistono correlazioni con cls danneggiato: pertanto si annota solo il valore del rimbalzo
- 4) Per zone sopra i 500 °C permette di tracciare una mappa del danno, quindi:
 - discriminare le zone esposte direttamente all'irraggiamento
 - paragonare i risultati su pilastri, pannelli, travi



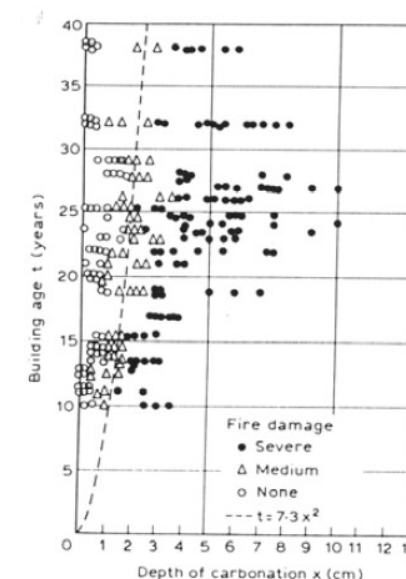
Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove chimiche sul cls

Il fenomeno della carbonatazione nasce a seguito della trasformazione della calce (idrossido di calcio/calce idrata + CO_2) in carbonato di calcio. Questo porta a un abbassamento della condizione basica della pasta di cemento, che diventa quindi potenzialmente pericolosa per la depassivazione delle barre di armatura e perciò, per la possibile corrosione.

Quindi, attenzione perchè:

1. Durante la fase di incendio si decompone l'idrossido di calcio che porta ad un abbassamento del PH (tanto più basso quanto più severo il danno)
2. Per valutare lo stato di carbonatazione si può spruzzare sulla superficie una soluzione di fenolftaleina che reagisce con l'idrossido e cambia di colore se non vi è abbassamento di basicità della pasta di cemento.



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove dirette di rottura sul cls

MICROCAROTE

Si deve limitare l'estrazione di microcarote al minimo necessario per non indebolire la struttura (diametro circa 30 mm)

Poi si esegue la prova di compressione diretta.

Il metodo è adottabile per cls con aggregato di diametro max 30 mm;

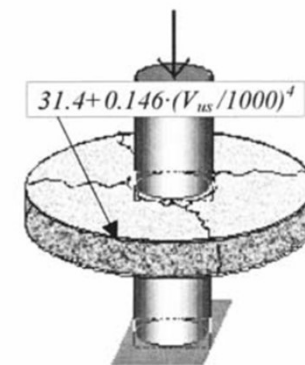
la correlazione fra esiti di microcarote e carote tradizionali è lineare e ben definita.

D.P.T. ("flat-disk punching test")

Per valutare direttamente la resistenza del calcestruzzo a diverse profondità si ricavano da una carota tradizionale diversi dischi (spessore t = circa $1/4 - 1/5$ del diam.carota $t=D/5=30/5=6$ mm) e si sottopongono a compressione con punzoni di diametro 20 mm

Con un'unica carota si determina il profilo del danneggiamento nello spessore dell'elemento esaminato

Flat-disk
punching test per
la valutazione
della resistenza
a compressione
del calcestruzzo



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove termografiche

Le zone degradate nel cls possono essere individuate tramite metodi termografici.

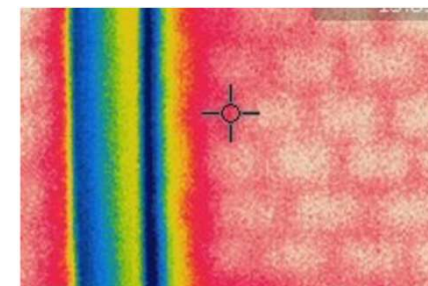
Si possono individuare:

Lesioni

Delaminazioni

Omogeneità di temperature durante l'incendio.

E' interessante eseguire la verifica in tempi successivi, durante la fase del raffreddamento per identificare il progredire degli effetti irreversibili prodotti dall'evento (decadimento più graduale, rispetto alle strutture in acciaio, perdita di resistenza totalmente irreversibile che prosegue nella fase di raffreddamento per un ulteriore 10%).



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

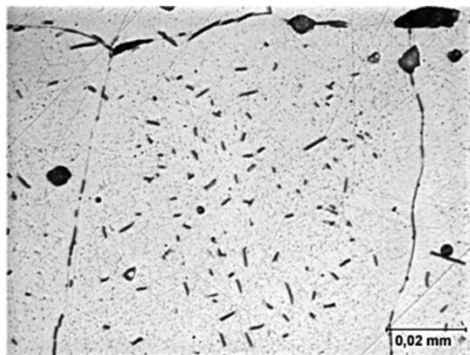
Prove su carpenteria metallica

Risultano molto interessanti le prove di durezza (**Leeb, Poldi, Vickers**)

Ed eventuali prove **micrografiche**

La temperatura raggiunta dalle strutture durante la fase di riscaldamento si può considerare uniforme su tutto il profilo delle travi/pilastri (alta conducibilità termica del materiale)

- Eseguendo le prove in posti diversi, opportunamente scelti, si possono distinguere la zona degradata dalle zone in cui la temperatura non ha influito sulle caratteristiche meccaniche.



Esempio di acciaio a seguito di trattamento normalizzante, sono visibili i grani di ferrite con separazioni interne: indice del degrado del materiale

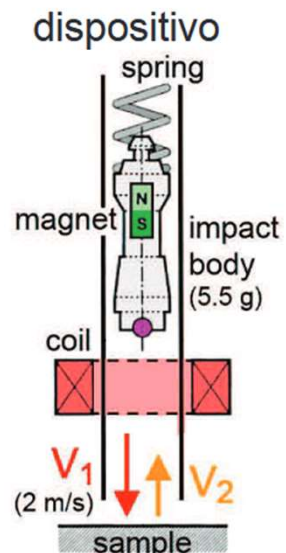
Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove su carpenteria metallica

	tipo	Caratteristiche e motivi
1	a rimbalzo "Leeb Test"	<p>conosciuto, semplice, poco costoso; misura della durezza su corpi solidi di spessori oltre i 30mm; strumenti di battuta intercambiabili per spessori più sottili, superfici più ridotte o grado di rugosità elevato.</p> <p>RIMBALZO – FUNZIONE DELLE VELOCITA' DI RIMBALZO</p>
2	a penetrazione	<p>Vecchio portatile ancora molto utilizzato perchè flessibile e adattabile a svariate applicazioni.</p> <p>Funziona come il durometro da banco ma con un carico molto inferiore; utilizzabile in qualsiasi situazione; costo molto sostenuto</p>
3	ad ultrasuoni UIC	<p>Applicabile per materiali duri o sottoposti a trattamenti di indurimento superficiali o a cuore. Non è particolarmente adatto alla misura su materiali teneri.</p> <p>ULTRASUONI – FUNZIONE DI MODULO ELASTICO E AREA INDENTATA</p>
4	a percussione Poldi Ernst	<p>semplice ed economico; attendibilità in alcuni casi dubbia a causa del sistema di rilevazione che mette in relazione il diametro dell'impronta con il valore della durezza indicato in tabella (affida l'interpretazione al tecnico che effettua il test)</p> <p>Usa barrette o spine tarate – PER CONFRONTO</p>

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove su carpenteria metallica



barra spianata e levigata



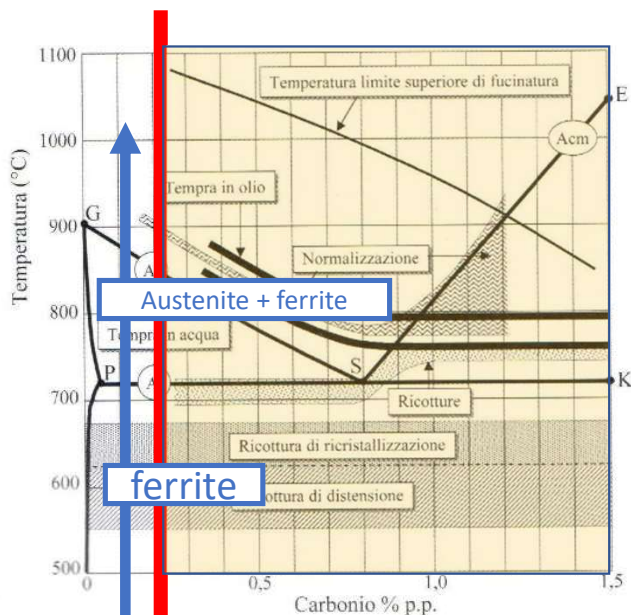
Misura dell'indice di rimbalzo di una massa dotata di un indentatore sferico che impatta sulla superficie adeguatamente preparata:

indice Leeb = rapporto velocità $V_2 / V_1 \times 1000$

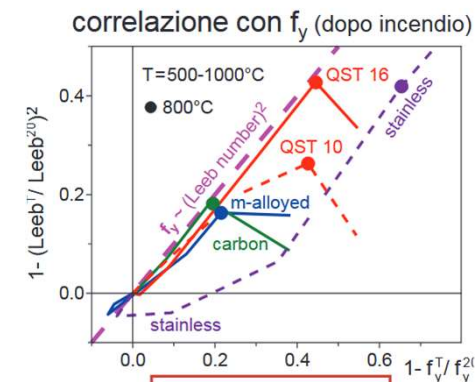
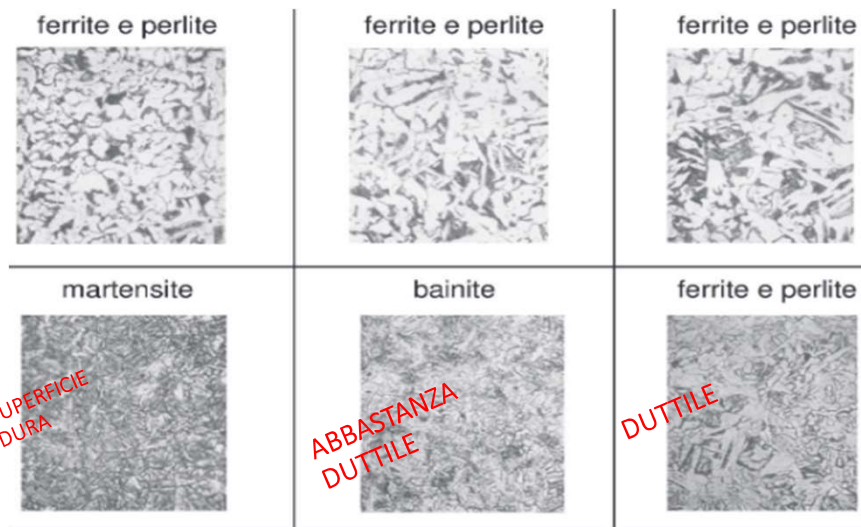
I trattamenti termici in stabilimento modificano la struttura dell'acciaio, visibili con l'ausilio di una macrografia/micrografia, ne consegue che è diversa anche la «risposta» della durezza del materiale.

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove Leeb – utilità post incendio



Dal tenore di carbonio, con la micrografia disponibile, con i conforti delle prove di durezza Leeb si deducono info importanti (a che temperatura è arrivato il nostro incendio e come si è raffreddato)



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove di carico

Possono essere:

-A flessione

1. Normali (verifica del carico che è conosciuto)
2. Cicliche (verifica del carico che è sconosciuto)

-A taglio

-Estensimetriche (verifica della tensione agente)

Trasmissione del carico:

- a) Carico puntuale (a spinta o a tiro)
- b) Carico distribuito (sacconi ad acqua, piscine, pallet, zavorre, ecc...)



Perché farle?

Perché il danno da incendio provoca danni irreversibili nel CALCESTRUZZO e nel LEGAME di ADERENZA acciaio-calcestruzzo

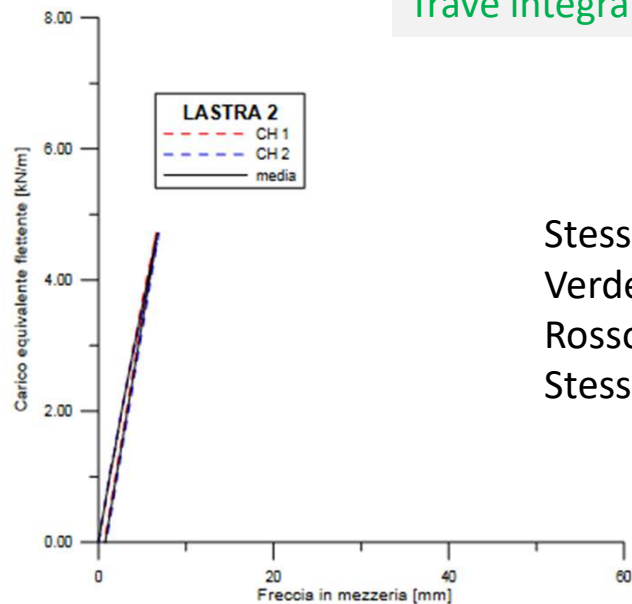
L'esposizione ad alte temperature provocano infatti deficit di:

- Resistenza residua
- Deformabilità

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove di carico statiche

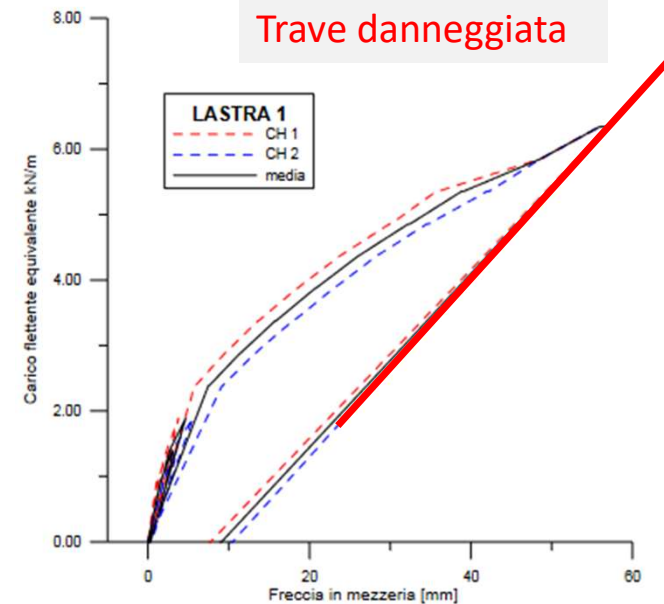
Trave integra



Stessi elementi:
Verde integro
Rosso danneggiato
Stessa storia di carico (1,5 $Q_{progetto}$)

Comportamento elastico
Freccia residua trascurabile

Trave danneggiata



Cambio pendenza (= riduzione rigidezza) alla formazione delle prime fessure
Grande isteresi
Significative frecce residue (indice di perdita di precompressione)

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esempio di prove di carico



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esempio di prove di carico



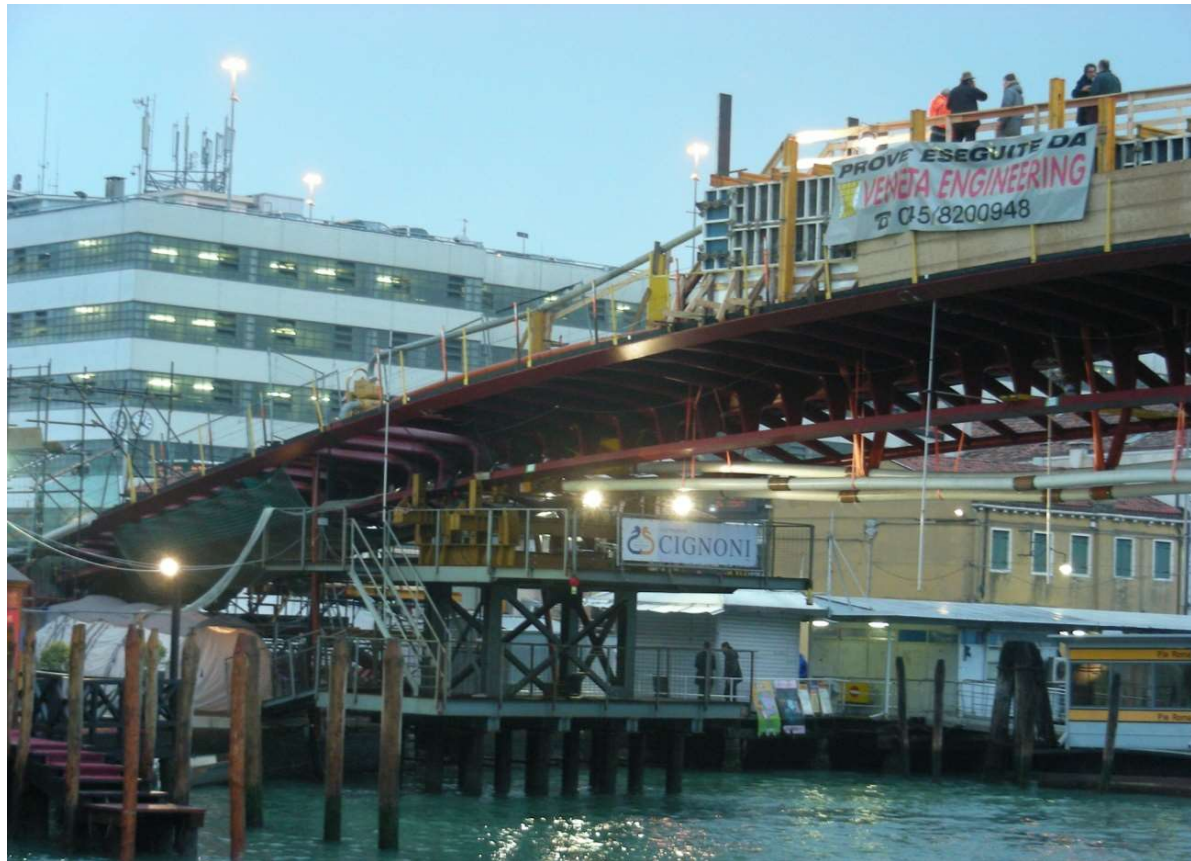
Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esempio di prove di carico



Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Esempio di prove di carico

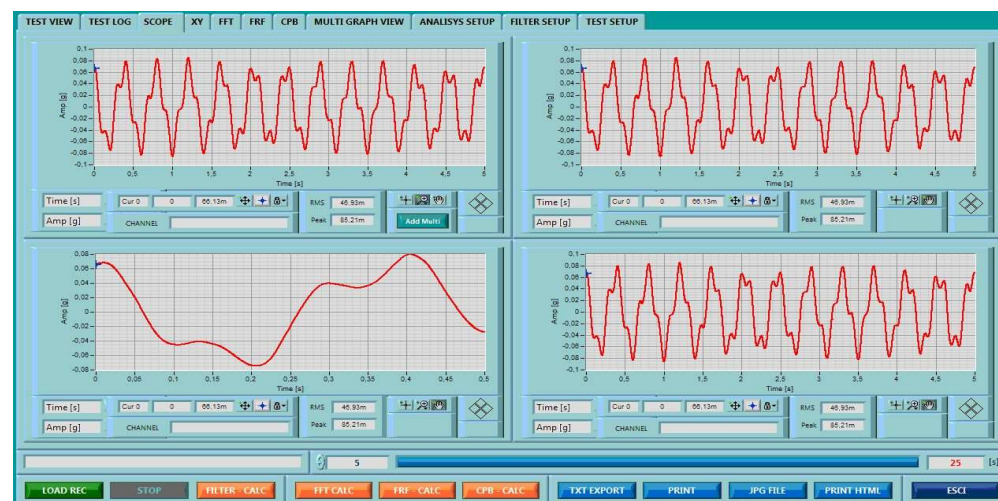


Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove dinamiche

Analisi comparativa di elementi strutturali sani / danneggiati

- **Caratterizzazione dinamica**
 - Determinazione caratteristiche dinamiche
- **Aderenza al progetto**
 - Identificazione anomalie di progettazione o di esecuzione
 - tensione di catene e funi e variazione di tensione nel tempo

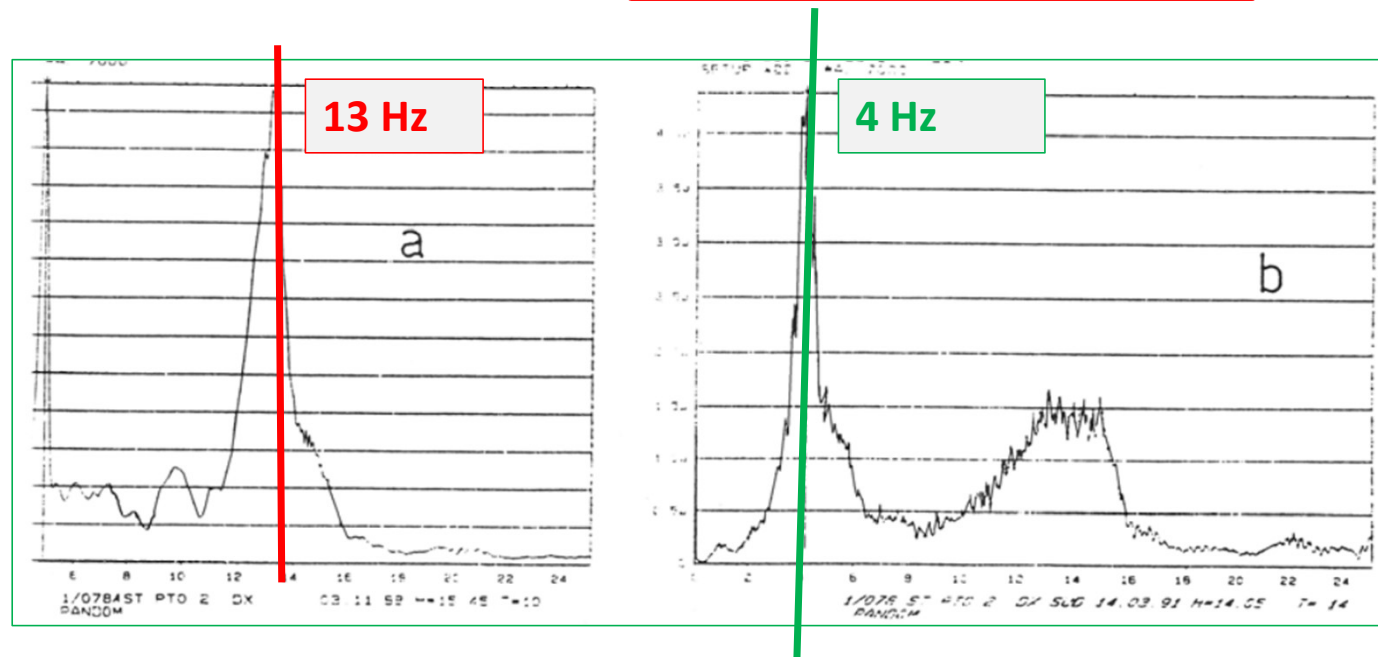


SCHEMATA
TIPICA

La frequenza propria dipende dalla rigidezza dell'elemento strutturale; a parità di altre condizioni, quindi, **un elemento danneggiato ha un periodo proprio di vibrazione inferiore a quello di un elemento integro (quindi frequenza maggiore)**

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

Prove dinamiche



Esempio di analisi dinamica di una struttura (impalcato da ponte)

Dopo l'incendio a) e **prima dell'incendio b)**

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

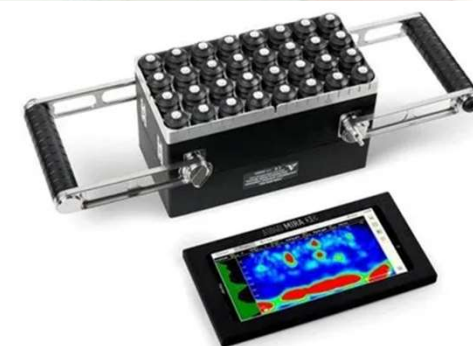
La nuova frontiera: il tomografo

COSA FA IL TOMOGRAFO

Sistema portatile per eseguire la tomografia ad ultrasuoni con restituzione imaging della struttura interna.

DESCRIZIONE

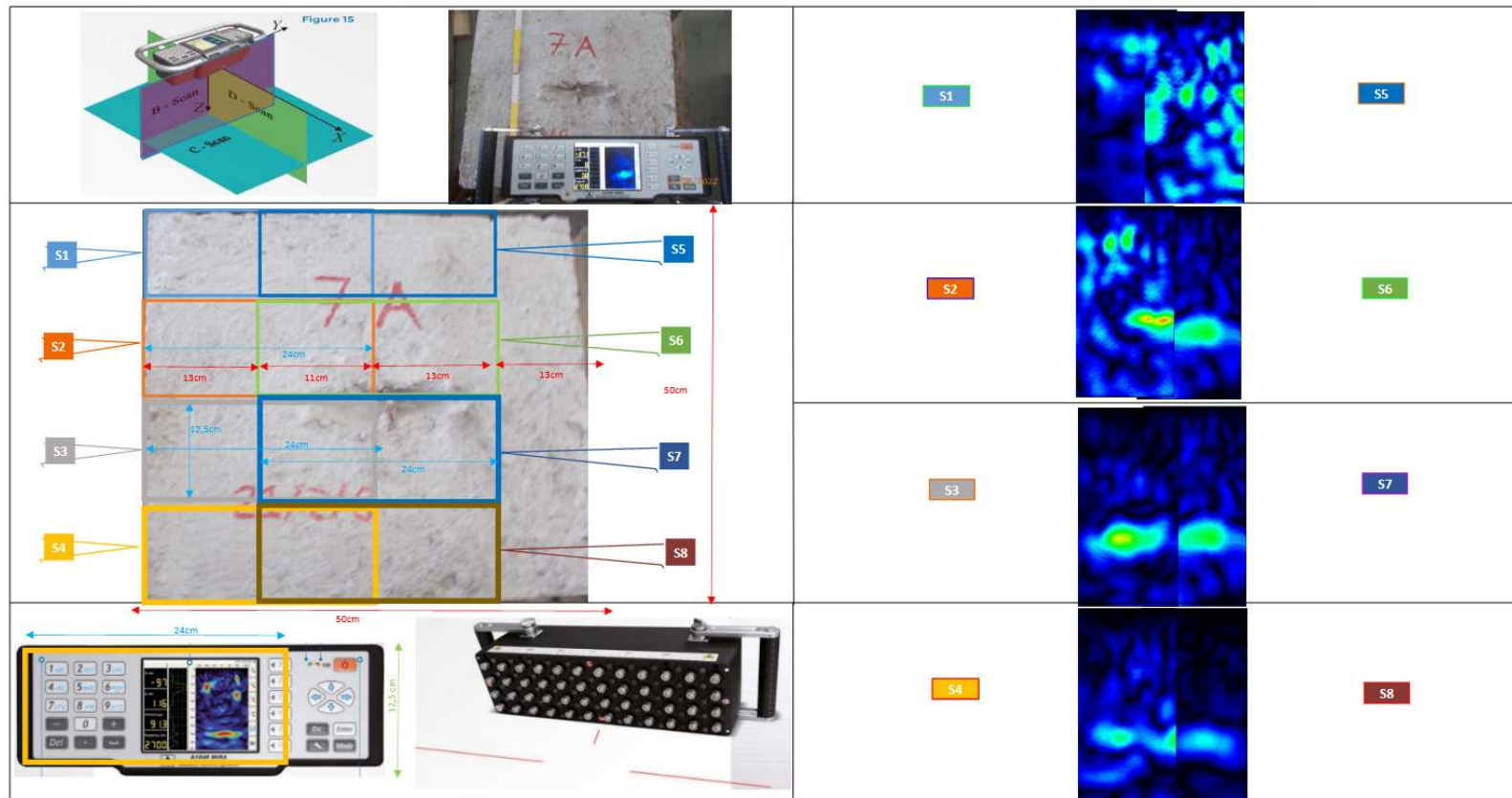
- acquisisce ed elabora la tomografia ottenuta da N (es.16) trasduttori piezoelettrici;
- Lo strumento lavora in linea: ogni blocco funziona come un singolo sensore che emette/riceve onde di taglio;
- utilizzabile su superfici ruvide ed irregolari;
- Lavora a frequenza centrale di 50 kHz, impostabile tra i 10 e 100 KHz posizione del centro di misura evidenziata da guida laser.
- Il vantaggio principale che deriva dall'adozione delle onde di taglio è di non subire conversioni di modo quando vengono riflesse e di essere caratterizzate da lunghezze d'onda più corte, quindi con una risoluzione più elevata, rispetto alle onde di compressione della stessa frequenza.
- A differenza dello strumento ad ultrasuoni tradizionale, che, come detto, utilizza il metodo diretto con emettitore e ricevitore a cavallo del materiale da indagare, poter lavorare da un solo lato della struttura, in riflessione, permette di identificare, all'interno del materiale, spessori, da cui l'uso frequente dello strumento in galleria, la presenza di elementi strutturali, quali ferri di armatura, o la localizzazione di cavi di precompressione e di eventuali difetti, ovvero la presenza di una frattura, nidi di ghiaia, vuoti o disomogeneità del materiale.



Ricerca inclusioni estranee, cavità, vuoti, delaminazioni, difetti di riempimento e crepe negli oggetti in cemento, oggetti in ca e pietra naturale

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

La nuova frontiera: il tomografo



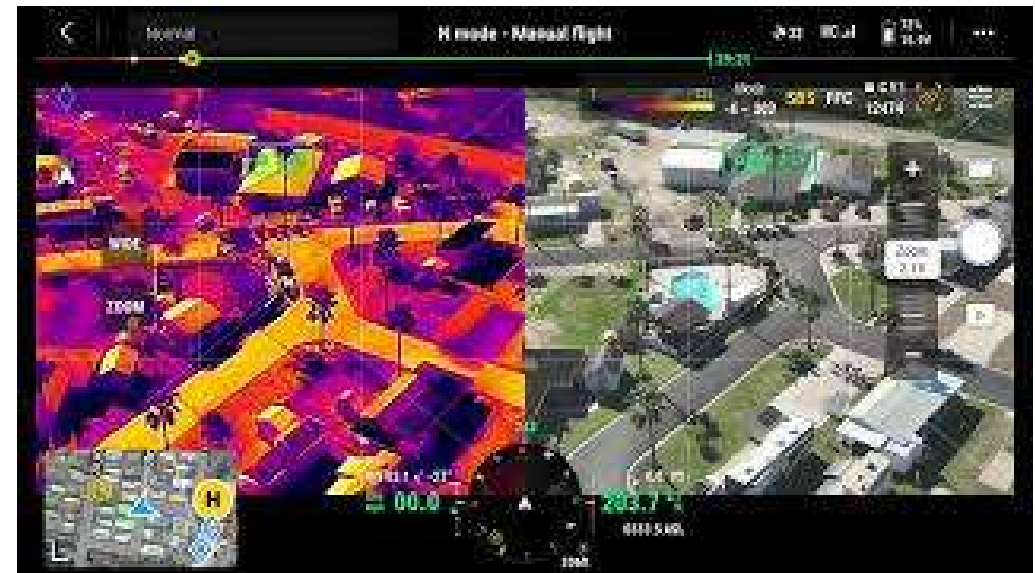
Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

La nuova frontiera: termografia con drone

Per ridurre i rischi ed ottenere visioni di ogni ambiente si utilizza un **drone** equipaggiato con

- Termocamera
- Telecamera a collimazione compensata

Si ottiene così un **rilievo della mappa termica a distanza** sovrapposto o sovrapponibile all'immagine visiva

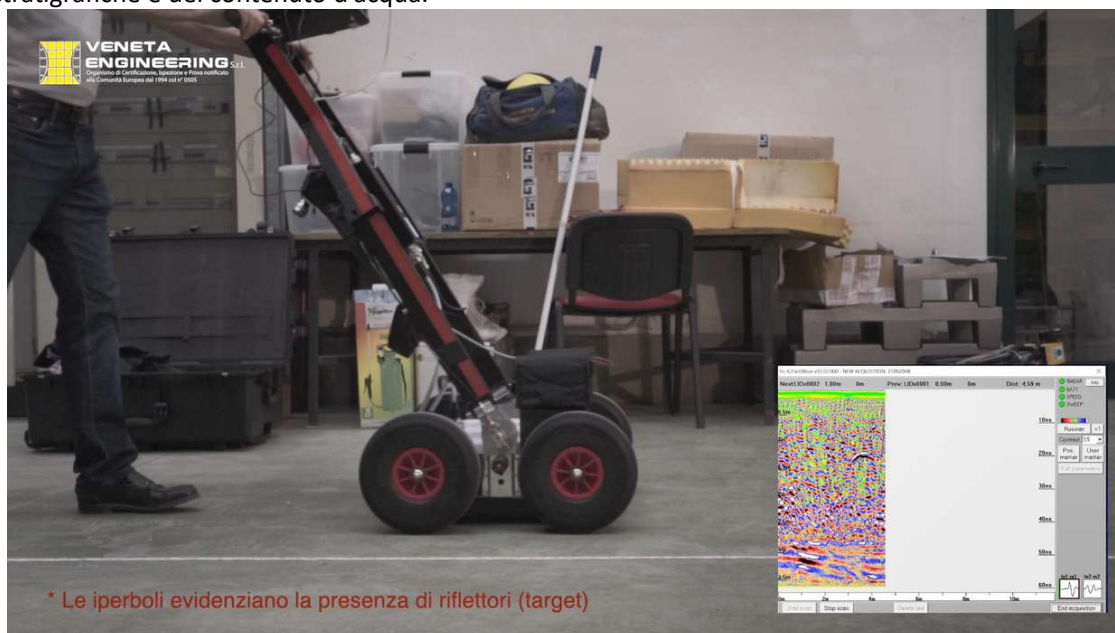


Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

La nuova frontiera: Georadar

Il metodo d'indagine georadar ([Ground Probing Radar – GPR](#)) si basa sulla emissione e riflessione delle onde elettromagnetiche (radiofrequenze) a bassa frequenza (40-100 MHz per una maggiore penetrazione) oppure ad alta frequenza (2500 MHz per una migliore risoluzione e qualità dell'immagine radar). Operativamente, la tecnica consiste nella **misura del tempo impiegato dal segnale a ritornare al ricevitore**, dopo essere stato parzialmente riflesso da eventuali discontinuità intercettate durante il suo percorso.

L'indagine restituisce importanti informazioni su eventuali discontinuità presenti nell'elemento in esame. Le durate e le ampiezze sono funzione dell'interfaccia di separazione di materiali a differente costante dielettrica (isolanti) o differente conducibilità elettrica, quindi del cambiamento delle proprietà elettriche del sottosuolo, quali variazioni litostratigrafiche e del contenuto d'acqua.



APPLICAZIONE

- Profondità variabili a seconda della frequenza utilizzata,
- Ricerca di inclusioni estranee, cavità, vuoti, delaminazioni, difetti di riempimento e crepe negli oggetti in cemento, oggetti in cemento armato e pietra naturale;
- Rilevazione di vuoti, stima della loro posizione
- Ricerca di armature
- Ricerca di sottoservizi
- Ecc. Ecc.

Prove tipiche per edifici assoggettati ad incendio

La nuova frontiera: Interferometro

- sistema basato su un radar interferometrico a microonde per il monitoraggio statico e dinamico a distanza, il radar interferometrico (IBIS-FS) viene utilizzato su ponti e altre strutture, tra cui edifici, monumenti storici e torri.
- Usato per prove di carico, analisi dello spostamento della struttura, misurare la frequenza di risonanza delle strutture, analisi modale



VANTAGGI:

Rilevamento a distanza

Misurazioni precise (0,01 mm a distanza di 0,5 Km)

Campionamento fino a 200 Hz,

Maggiore efficienza nel monitoraggio dello stato strutturale attraverso l'utilizzo di una tecnica di monitoraggio delle vibrazioni non invasivo

Controllo a distanza e preciso di un ponte o di una struttura

Riduce il tempo necessario a pochi minuti per le prove di carico strutturali statiche e dinamiche su un ponte

Fornisce dati in tempo reale sulle vibrazioni strutturali e sulle frequenze naturali

Caso Studio

Intervento a seguito del rogo dello stabilimento della Bauli, Castel D'Azzano Verona 1996

Esempio di intervento in simbiosi con il Progettista, arch. Claudio Poiani:

Decisioni da assumere ed assunte [demolire o riparare?]

Conseguenze sulla progettazione e la ricostruzione

Azioni simbiotica di tecnici di laboratorio, progettisti e costruttori



Nel 1996 un rogo distrusse quasi completamente un capannone di nuova realizzazione di quasi 20000mq



Il muro REI ha permesso
di mantenere integra
una parte dello stabilimento



Quel che l'occhio non vede lo vedono gli strumenti della Veneta Engineering, che ha sede a Verona. L'azienda è nata nel 1980 e si occupa del controllo degli impianti, dei materiali da costruzione, degli edifici. Si tratta di un'attività abbastanza inedita nel panorama italiano, che permette di prevenire disastri, di calcolare scientificamente la portata delle strutture, di migliorare i materiali d'uso. Loris Turella, l'ingegnere responsabile dell'azienda, lavorava come capocantiere in Germania e ha importato il know how acquisito in quel Paese: "Se là controllano tutto - si è detto - prima o poi questo dovrà succedere anche in Italia". L'intuizione ha avuto successo anche se tardivamente, grosso modo quindici anni dopo che l'ingegnere aveva iniziato la sua esperienza pilota.

Le strumentazioni messe a punto, che prevedono indagini di tutti i tipi, sono state in parte comprate e in parte realizzate direttamente dall'azienda sulla base della propria esperienza.

Nella logica di salvare il salvabile, perseguita dall'architetto Poiani, la Veneta Engineering viene interpellata per verificare scientificamente quanto è recuperabile e quanto non lo è.

"Il problema - dice Turella - si presentava in questo modo: riuscire a capire e quindi selezionare le parti ammalorate e quelle possibilmente sane, intendendo con quest'ultimo concetto anche le strutture eventualmente riparabili". L'indagine dell'ingegnere è volta a stabilire in particolare quale sia, al di là dell'apparenza, al di là di ciò che l'occhio vede, lo stato interno dei pilastri dopo l'incendio: "I pilastri sono in calcestruzzo. Bisognava capire come avessero reagito i materiali che li compongono e riuscire a stabilire con sufficiente certezza - comunque almeno con una certezza ingegneristica - il livello di sicurezza residuo. Anzitutto bisogna dire che non avevamo dati iniziali di composizione di quel tipo di materiale. L'unica via possibile era pertanto quella del confronto: confronto tra una struttura sana ed una struttura ammalorata.



Quali sono i dati emergenti? Qual era il fenomeno che si era verificato sulle strutture visivamente intaccate dall'incendio? Ora occorre fare una premessa al ragionamento successivo: l'incendio sviluppa calore, il calore si trasferisce all'interno, la parte acquosa contenuta nelle strutture si scalda, arriva alla temperatura di ebollizione, passa da stato liquido a vapore; in presenza di ulteriore calore aumenta la pressione interna (a volume costante), fino a quando essa è sufficiente a spezzare le pareti cementizie che avvolgono le bolle. Di questo fenomeno una parte è visibile ed un'altra non lo è. La parte visibile si manifesta con distacchi, la parte non visibile è costituita dalle microfrazioni interne che costituiscono in seguito la via preferenziale di rottura in caso di carico sul materiale".

Detto in soldoni: i pilastri potrebbero anche apparire sani, ma in seguito cadere sotto il peso delle strutture per effetto del deterioramento non visibile. L'ingegner Turella è stato chiamato appunto a sottoporre a verifica lo stato di salute interno di queste strutture e lo ha fatto applicando la tecnica degli ultrasuoni:

"Il comportamento degli ultrasuoni permette di verificare la presenza o meno di microfrazioni all'interno della struttura. Noi abbiamo delle strumentazioni che sono in grado di creare ultrasuoni, emetterli e verificarne il percorso. Nel caso specifico la tecnica è stata applicata ai pilastri, a quelli sani e a quelli visibilmente ammalorati, e quindi ad alcune travi. Lo strumento registra il tempo di percorrenza degli ultrasuoni nell'attraversamento del materiale e quindi se ne deduce la velocità. La velocità è influenzata fondamentalmente dalla massa specifica ed è diversa a seconda che si tratti di materiale omogeneo e isotopo - ad esempio una colata di acciaio, senza bolle - oppure disomogeneo come il calcestruzzo con tutte le sue macrocomponenti. Tutto ciò fa parte delle conoscenze tecniche generali, non l'abbiamo certo inventato noi: se nel materiale ci sono dei vespai, cioè delle zone in cui gli aggregati non sono collegati tra loro da pasta cementizia, e quindi c'è presenza di aria, la velocità degli ultrasuoni diminuisce: perché deve attraversare superfici di separazione tra materiali, e l'aria, che è un mezzo molto meno denso del calcestruzzo. In caso di microfrazioni si verifica questo fenomeno ed ha costituito il punto di partenza della nostra ricerca. Quando siamo andati ad applicarla, vista la indeterminatazza del sistema, abbiamo dovuto trovare dei metodi matematici che ci permettessero di valutare con sufficiente precisione i punti in cui

cambiava la natura del materiale, potendo fare solo e soltanto delle misure dall'esterno. Ed allora, nell'ipotesi di una corteccia ammalorata, di un nucleo sano e di un'eventuale altra corteccia intaccata oppure no, bisognava implementare un sistema di equazioni che avessero per incognita lo spessore dell'ammaloramento e come valori noti la velocità degli ultrasuoni nelle parti ammalorate e in quelle sane. Per determinare le due velocità citate dovevamo avere termini di riferimento. Un elemento per il confronto non poteva che essere un pilastro assolutamente sano, della stessa natura e della stessa composizione di quelli da verificare. Siamo stati fortunati: in loco esistevano dei pilastri sicuramente non intaccati dalle fiamme e perfettamente uguali a quelli che avevano subito l'effetto devastante dell'incendio. Il secondo elemento di confronto erano i pilastri che anche visivamente manifestavano gli effetti distruttivi dell'incendio. Dunque, tra questi due estremi - pilastri sani e pilastri completamente ammalorati - abbiamo costruito la nostra scala di valori intermedi. Siamo così riusciti a valutare con moltissime misure - e direi con una precisione quasi incredibile - la velocità degli ultrasuoni nei pilastri in esame e quindi la profondità dell'ammaloramento nei vari punti, acquisendo la possibilità di tracciare delle mappe per i pilastri riparabili. In sostanza siamo riusciti a stabilire con precisione la configurazione delle cortecce ammalorate. Questo, in un primo tempo, a livello del tutto teorico. Successivamente siamo passati al controllo pratico del metodo adottato ed abbiamo constatato che ci sbagliavamo al massimo di qualche millimetro, e il millimetro nel campo del civile equivale ad una precisione assoluta. In conclusione: il nostro metodo era accettabile e forniva dati utili, tanto che ha suscitato anche un qualche interesse nella comunità tecnica".

Sarà banale ricordare a questo punto il vecchio detto del fare di necessità virtù. La necessità aguzza l'ingegno. Il percorso tradizionale implicava sopralluoghi e lunghe analisi di laboratorio. Per la gestione dei dati acquisiti sarebbero passati dei mesi. Ma il problema è che l'azienda ha bisogno di riprendere a lavorare, e subito.

Turella: "L'architetto Poiani, che è uno pratico, si è rivolto a me e mi ha detto: 'Se aspetto, perdo la campagna dei pandori. Dammi un suggerimento. Ho bisogno di soluzioni rapide e sicure'. E noi abbiamo messo a punto questo metodo. Per la prima volta abbiamo sperimentato un sistema per applicazioni rapide di cantiere, che magari non fun-



zionerà in maniera perfetta, ma che si è verificato assolutamente funzionale alle esigenze dell'azienda in questione". La felice combinazione tra la scienza e la pratica di cantiere ha permesso un lavoro di squadra che ha ipotizzato soluzioni, le ha sperimentate, le ha sottoposte a rigido controllo teorico per poi applicarle a tappeto. Tutte le scelte tecniche operate sono state supervisionate dai professori universitari incaricati dalle assicurazioni, che hanno dato il loro assenso.

Per un'idea più tecnica del lavoro svolto, diamo nelle pagine successive una piccola serie di analisi esemplificative svolte dalla Veneta Engineering su quattro pilastri.

Oltre a quantificare genericamente lo stato delle strutture, due erano sostanzialmente i nodi da sciogliere per l'architetto Poiani: stabilire l'entità del danno subito dai pilastri che delimitavano la zona a temperatura controllata e quella produttiva da una parte, e l'entità del danno sui pilastri che affondavano nel piano interrato. In questo secondo caso, in particolare, se le strutture fossero risultate completamente andate, bisognava demolire tutto perdendo mesi preziosi. Oltre che soldi. All'inizio della sperimentazione si doveva dare un giudizio rapido sul fatto visto nel suo complesso. Essendo le strutture di calcestruzzo armato, si dovevano valutare le situazioni dei due materiali: calcestruzzo e acciaio. Per l'aspetto generale le analisi dell'ingegner Turella portano ad un primo dato: la temperatura ha degradato il calcestruzzo, ma non è arrivata a valori tali da compromettere anche l'acciaio: "L'acciaio modifica la sua struttura interna, con i processi noti nella tecnica come trattamenti termici - spiega Turella - in base alla storia della temperatura che ha subito. Per storia intendiamo l'andamento temperatura-tempo. Quindi, prelevando un pezzo di acciaio dello stesso tipo nelle parti certamente sane e facendo un'analisi della struttura interna, una micrografia - leggendo il tipo di struttura cristallina - abbiamo incominciato a confrontarla con le strutture delle parti ammalorate ed abbiamo visto che non vi era alcuna differenza". I pilastri erano dunque intaccati, ma lasciavano l'armatura metallica integra. Per quelli a ridosso della zona di climatizzazione e della zona produzione e cartonnaggio si fa un'accurata analisi, andando a recuperarli, dopo averli scarificati fino al punto esatto dell'ammaloramento, trattandoli successivamente con resine e calcestruzzo. Invece non vi era interesse alcuno a cercare di recuperare i pilastri che non avevano alcuna funzione particolare e vengono demoliti.

Problema: riuscire a capire quali parte fossero degradate e quali salvabili,
NEL MINOR TEMPO POSSIBILE PER POTER METTERE IN SICUREZZA LA STRUTTURA E
RIPRENDERE, QUINDI, LA PRODUZIONE.

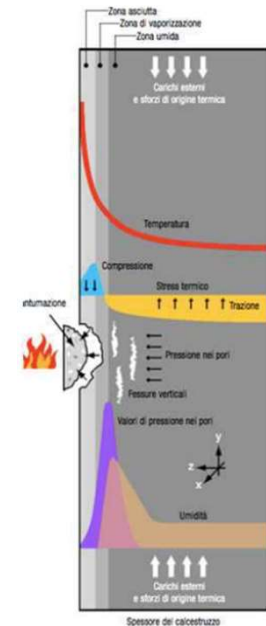
Quanto e come era penetrato l'incendio nella struttura e quante microfratture si era
quindi create che l'occhio non poteva vedere?

Soluzione: trovata nell'applicazione di metodo ad ultrasuoni.

- Metodo rapido che bypassava sopralluoghi e lunghe analisi di laboratorio
- Presenza di pilastri integri, da cui ricavare la velocità nel calcestruzzo integro.
- Ricerca di metodi matematici che permettessero di valutare come varia la natura del materiale
- Nr incognite (tempi, velocità, spessori) = Nr equazioni



Sistema definito, quindi risolvibile, soluzione trovata !

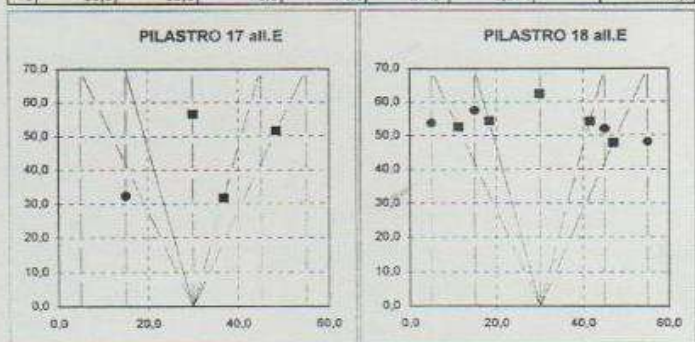


MISURA DELLE VELOCITA' ULTRASONICHE CON METODO DIRETTO							
DATI DI RIFERIMENTO		Zona integra		Zona degradata		PILASTRO 17 all.E	
Tempo	(microsec)	128,5		128,5		a m.1,30 dalla base	
Lunghezza	(cm)	60,5		60,5			
Velocità	(km/sec)	4,708		4,872			
Attenuazione	(Db)	40		46			

distanza da angolo		lunghezza pilastro (cm)	percorso onda (cm)	Tempi (msec)	Velocità (km/sec)	Attenuazione (Db)	Stima lung. parte sana (cm)
interna (cm)	esterna (cm)						
1	5,0	5,0	70,0	150,1	4,664	46	-16,0
2	15,0	15,0	70,0	149,3	4,689	32	32,4
3	30,0	30,0	70,0	148,9	4,701	32	56,5
4	45,0	45,0	70,0	150,7	4,645	34	-52,3
5	55,0	55,0	70,0	154,5	4,531	38	-282,2
6	30,0	5,0	70,0	74,3	4,710	40	78,9
7	30,0	15,0	70,0	71,6	4,732	38	117,1
8	30,0	30,0	70,0	70,0	4,701	32	56,5
9	30,0	45,0	70,0	71,6	4,686	36	32,4
10	30,0	55,0	70,0	74,3	4,699	40	54,7

DATI DI RIFERIMENTO		Zona integra		Zona degradata		PILASTRO 18 all.E	
Tempo	(microsec)	130,9		250,1		a m.1,30 dalla base	
Lunghezza	(cm)	60,5		60,5			
Velocità	(km/sec)	4,622		2,419			
Attenuazione	(Db)	54		>100			

distanza da angolo		lunghezza pilastro (cm)	percorso onda (cm)	Tempi (msec)	Velocità (km/sec)	Attenuazione (Db)	Stima lung. parte sana (cm)
interna (cm)	esterna (cm)						
1	5,0	5,0	70,0	183,7	3,811		53,6
2	15,0	15,0	70,0	176,1	3,975		57,5
3	30,0	30,0	70,0	166,8	4,202		62,3
4	45,0	45,0	70,0	187,1	3,741		51,9
5	55,0	55,0	70,0	194,9	3,592		47,9
6	30,0	5,0	70,0	74,3	3,764		58,7
7	30,0	15,0	70,0	71,6	3,839		56,5
8	30,0	30,0	70,0	70,0	4,209		62,5
9	30,0	45,0	70,0	71,6	3,828		55,3
10	30,0	55,0	70,0	74,3	3,584		50,7

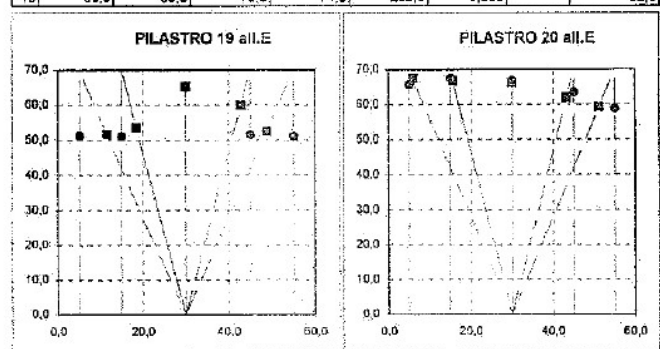


MISURA DELLE VELOCITA' ULTRASONICHE CON METODO DIRETTO							
DATI DI RIFERIMENTO		Zona integra		Zona degradata		PILASTRO 19 all.E	
Tempo	(microsec)	137,7		289,1		a m.1,30 dalla base	
Lunghezza	(cm)	60,5		60,5			
Velocità	(km/sec)	4,394		2,248			
Attenuazione	(Db)	58		100			

distanza da angolo		lunghezza pilastro (cm)	percorso onda (cm)	Tempi (msec)	Velocità (km/sec)	Attenuazione (Db)	Stima lung. parte sana (cm)
interna (cm)	esterna (cm)						
1	5,0	5,0	70,0	200,1	3,499	90	51,2
2	15,0	15,0	70,0	200,5	3,491	96	51,0
3	30,0	30,0	70,0	170,1	4,115	62	65,0
4	45,0	45,0	70,0	199,5	3,509	96	51,5
5	55,0	55,0	70,0	200,5	3,491	82	51,0
6	30,0	5,0	70,0	74,3	3,614	78	54,8
7	30,0	15,0	70,0	71,6	3,590	>100	54,8
8	30,0	30,0	70,0	70,0	4,132	66	65,4
9	30,0	45,0	70,0	71,6	3,863	96	61,3
10	30,0	55,0	70,0	74,3	3,549	88	55,8

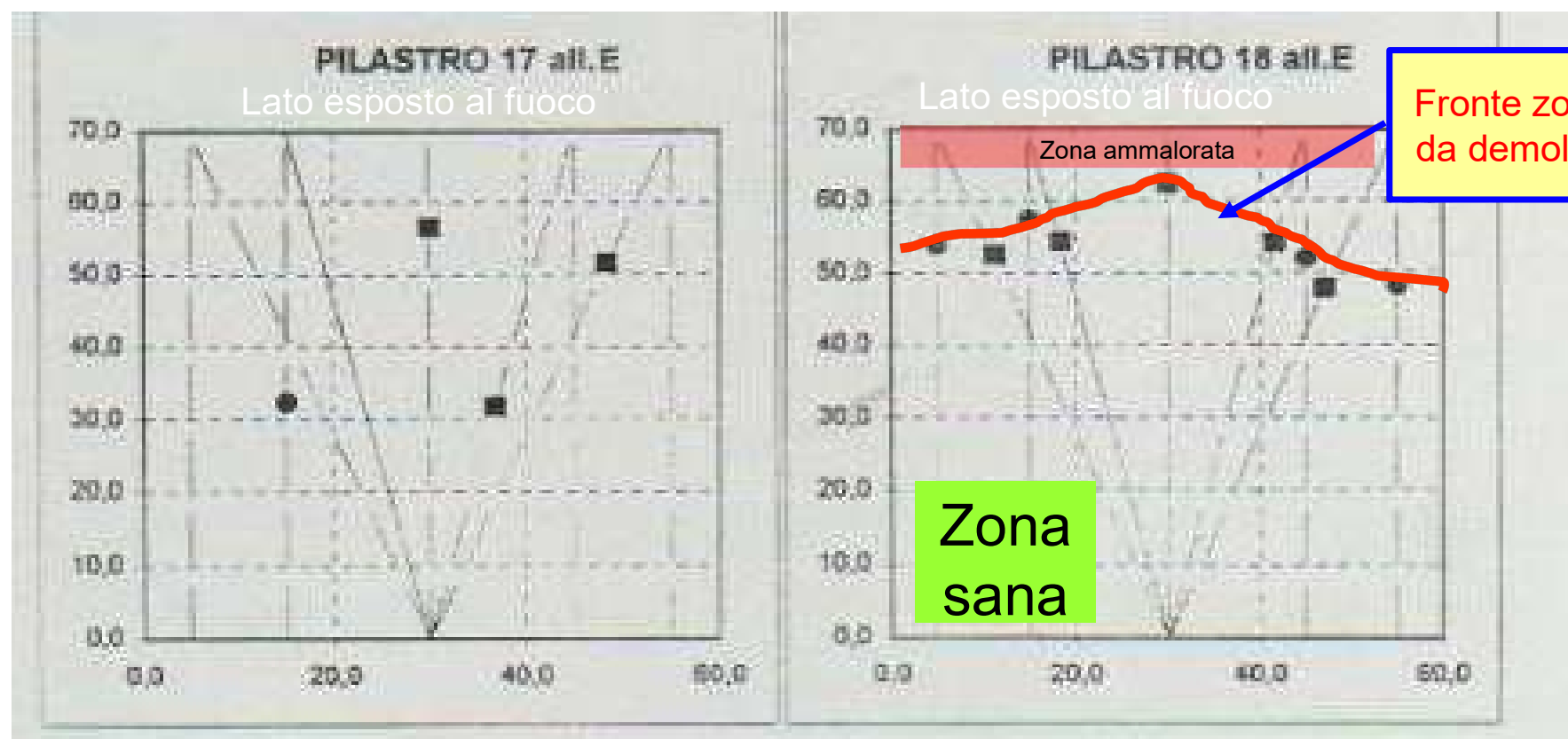
DATI DI RIFERIMENTO		Zona integra		Zona degradata		PILASTRO 20 all.E	
Tempo	(microsec)	132,5		375,3		a m.1,30 dalla base	
Lunghezza	(cm)	60,5		60,5			
Velocità	(km/sec)	4,565		1,512			
Attenuazione	(Db)	55		>100			

distanza da angolo		lunghezza pilastro (cm)	percorso onda (cm)	Tempi (msec)	Velocità (km/sec)	Attenuazione (Db)	Stima lung. parte sana (cm)
interna (cm)	esterna (cm)						
1	5,0	5,0	70,0	170,7	4,101		65,7
2	15,0	15,0	70,0	163,5	4,281		67,5
3	30,0	30,0	70,0	166,3	4,209		66,8
4	45,0	45,0	70,0	179,7	3,895		63,4
5	55,0	55,0	70,0	198,5	3,526		58,7
6	30,0	5,0	70,0	74,3	4,287		71,7
7	30,0	15,0	70,0	71,6	4,214		68,3
8	30,0	30,0	70,0	70,0	4,147		66,1
9	30,0	45,0	70,0	71,6	3,765		63,3
10	30,0	55,0	70,0	74,3	3,560		52,9



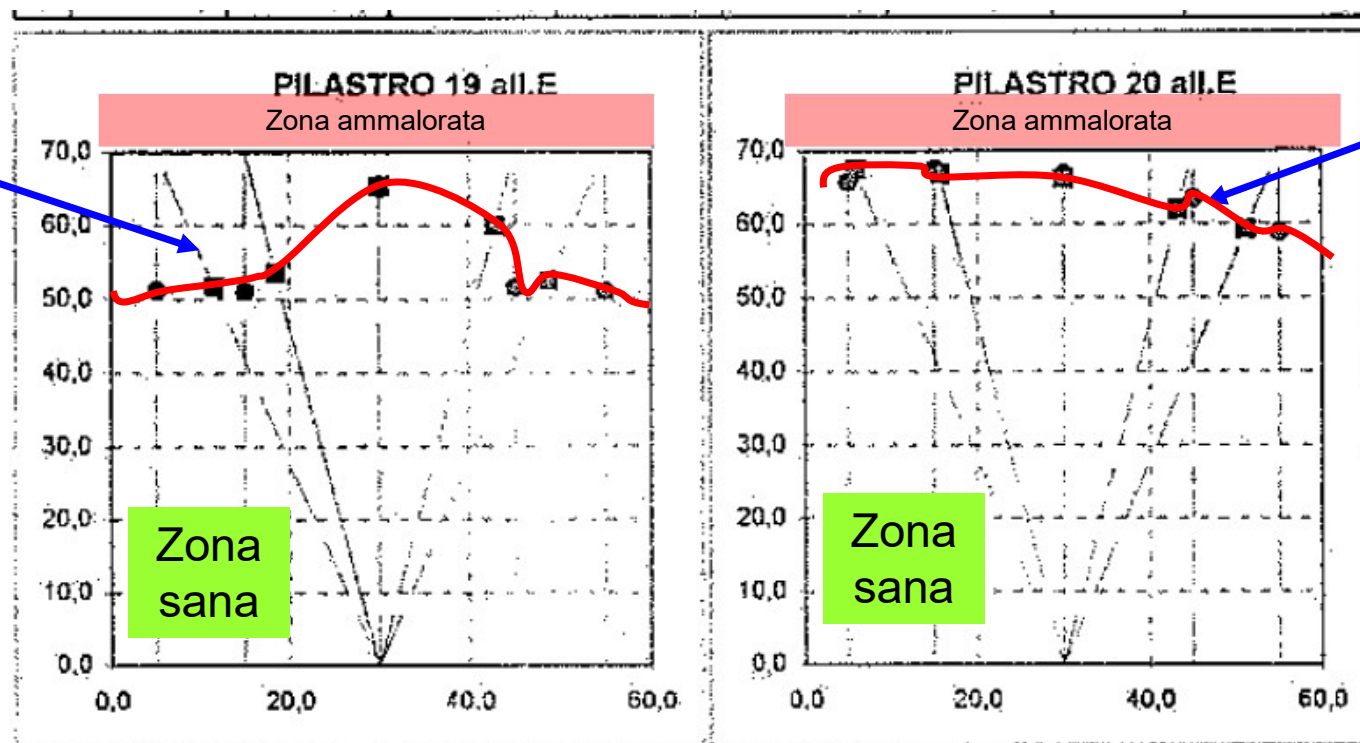
ELABORAZIONE DATI
DELLE PROVE
ULTRASONICHE

ELABORAZIONE dei DATI provenienti dalle PROVE ULTRASONICHE



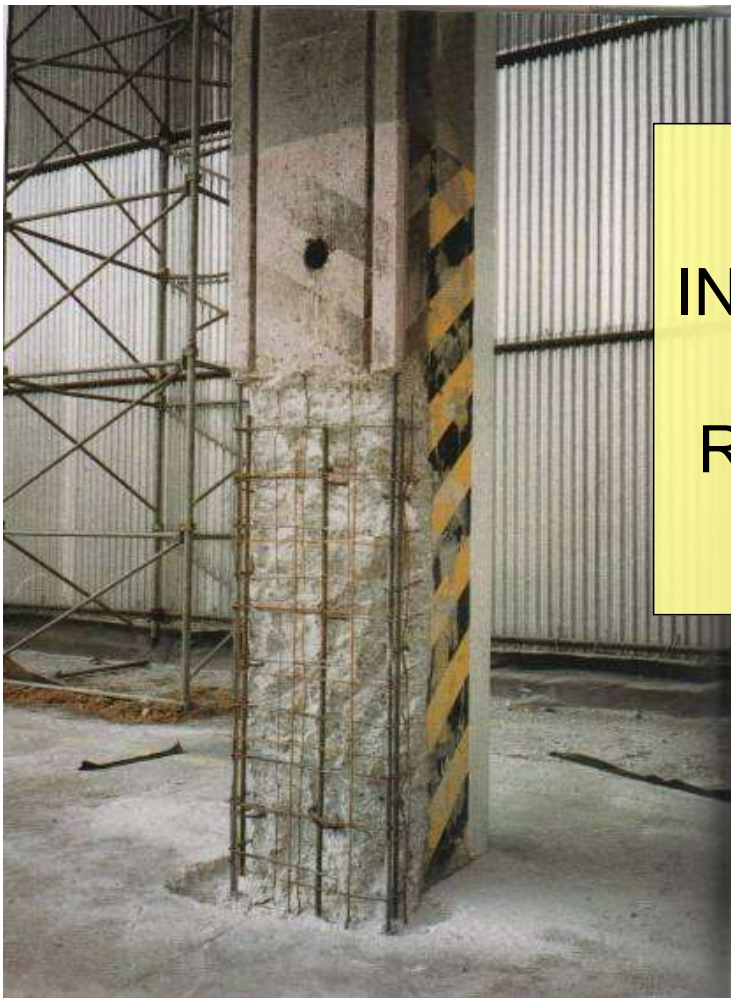
ELABORAZIONE dei DATI provenienti dalle PROVE ULTRASONICHE

Fronte zona
da demolire

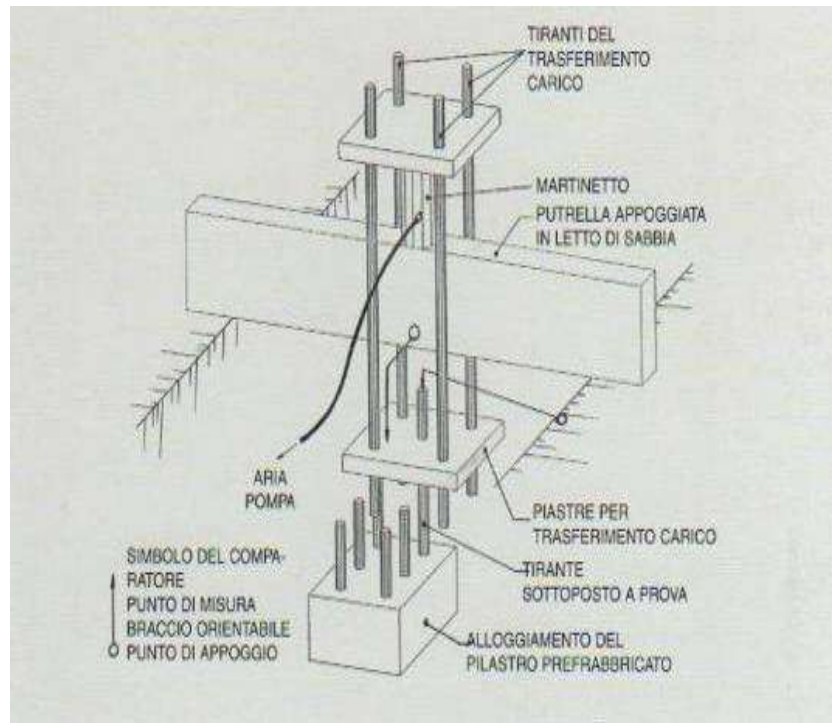


Fronte zona
da demolire

INTERVENTO DI RIPRISTINO



VERIFICA DEI TIRAFONDI PER PIASTRA A SUPPORTO DEI NUOVI PILASTRI - ATTREZZATURA



UTILIZZO DELLE CONNESSIONI



VERIFICA DI PANNELLI E TRAVI – STATO PRE-INTERVENTO –



PANNELLI E TRAVI

INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

