

133YPNB

Požární návrh betonových a zděných konstrukcí

2. přednáška

prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební
katedra betonových a zděných konstrukcí

Obsah přednášky

- Chování betonových a zděných konstrukcí při požáru.
- Vlastnosti betonu a výztuže při zvýšených teplotách.
- Principy návrhu betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru, návrhové přístupy.

Chování betonových a zděných konstrukcí při požáru

Příklad požáru skutečného objektu

Windsor Tower, Madrid
12. února 2005

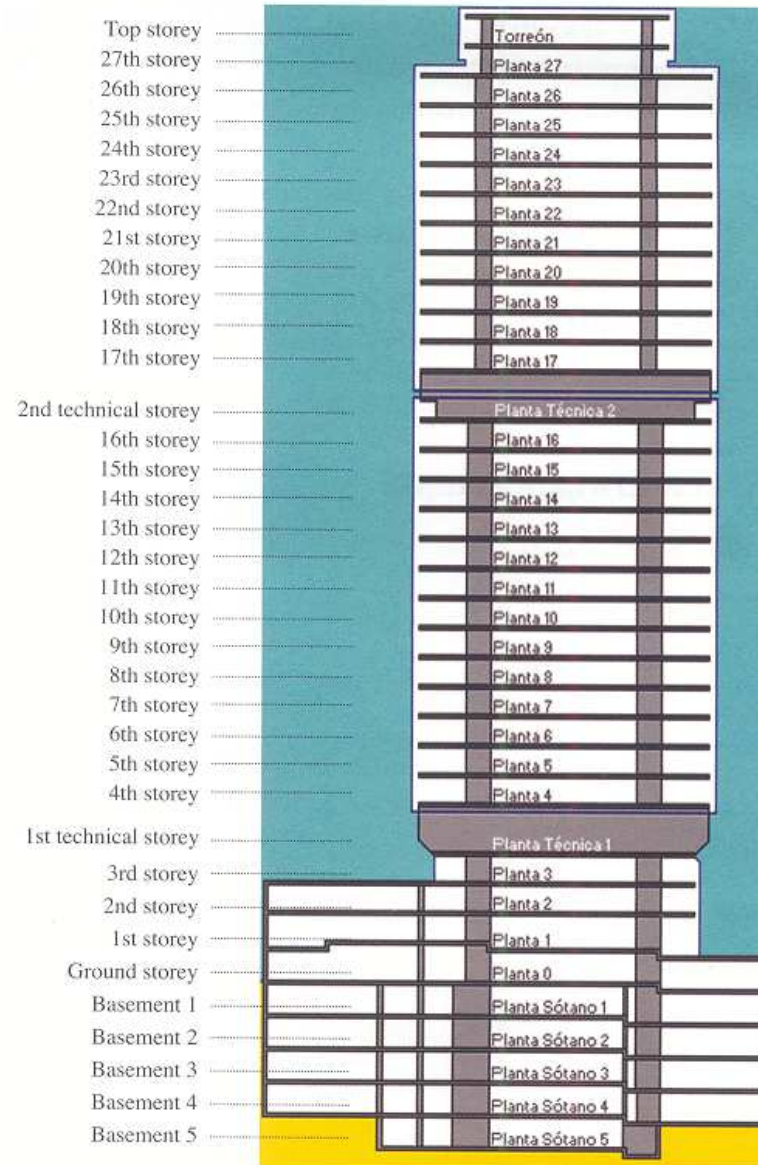


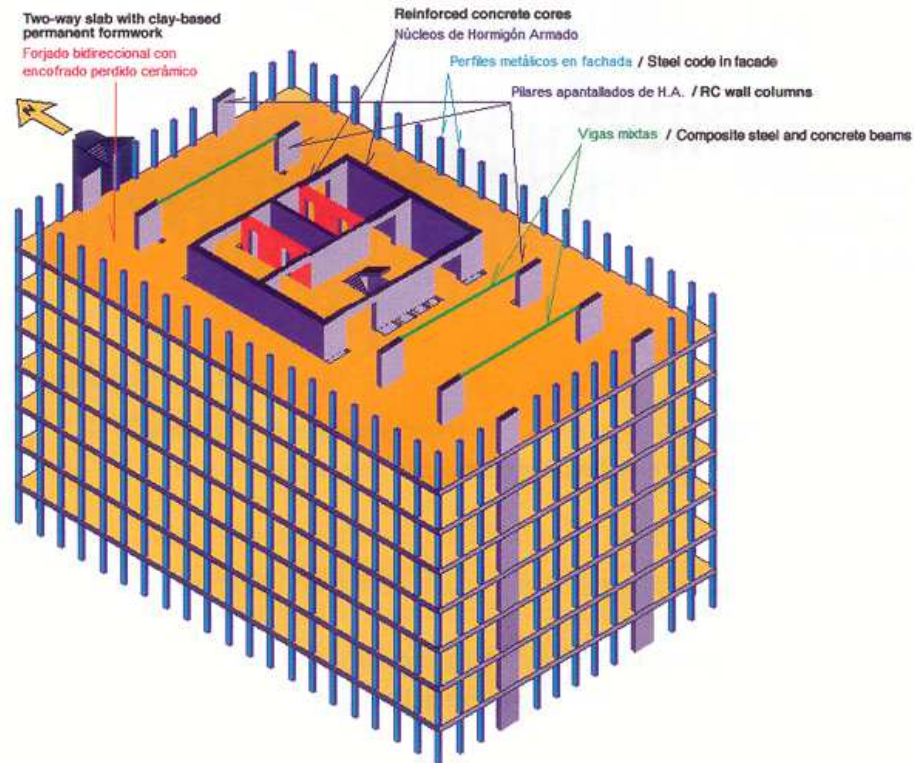
Windsor Tower - svislý řez

- 5 podzemních podlaží
- přízemí
- 27 podlaží - kanceláře
- 2 technická podlaží
- horní podlaží
- střecha

- dolní podlaží - lichoběžník
- od 3. podlaží - obdélník
40 m x 26 m

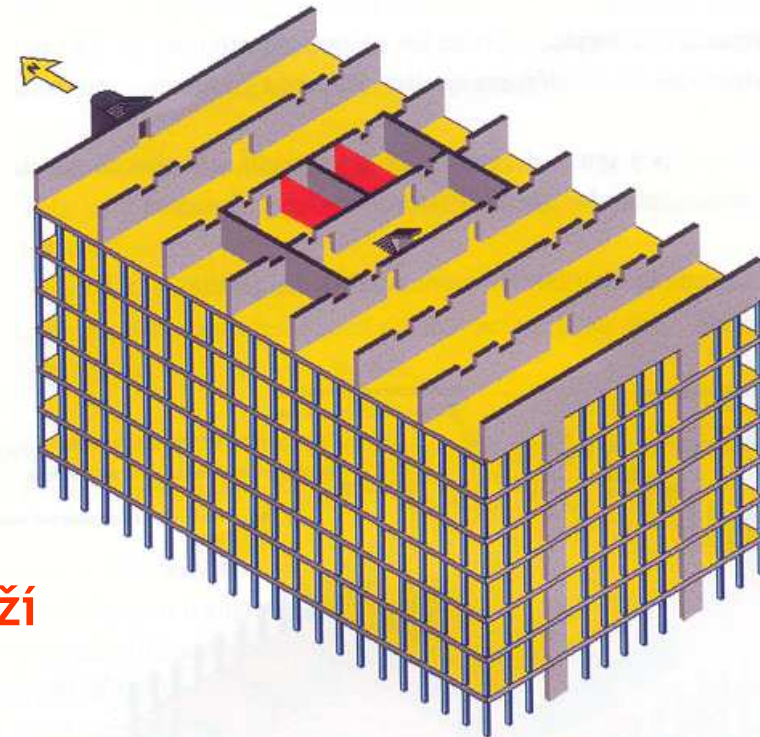
- postavena v letech 1974-1979



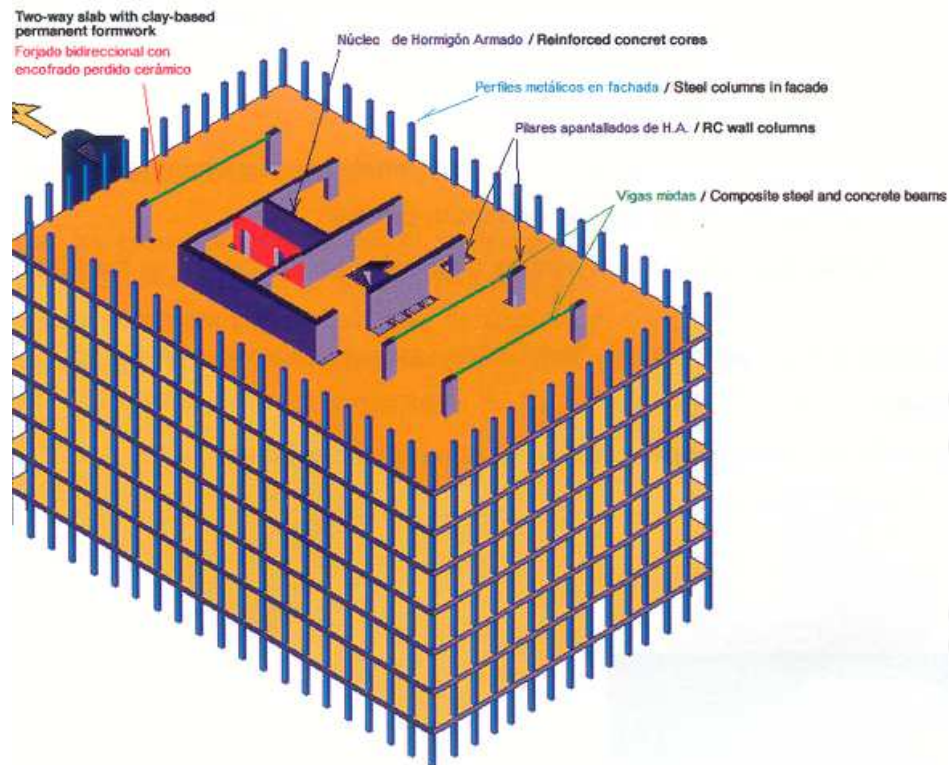


4.-16. podlaží

Beton: jádro, portálové rámy, široké sloupy ve fasádě
Ocel: sloupy ve fasádě



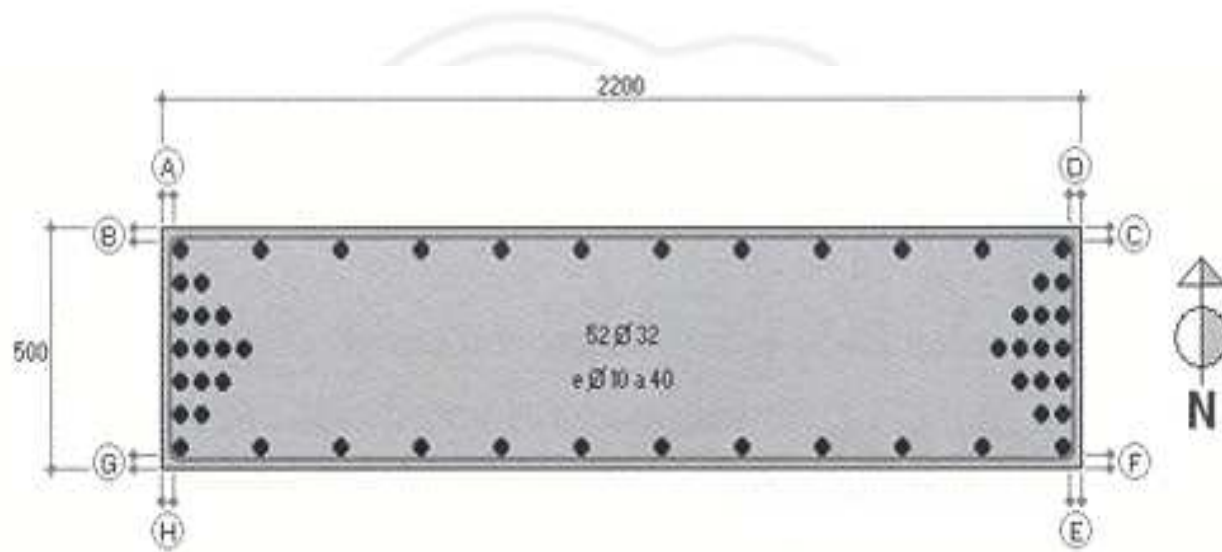
2. technické podlaží (nad 16. podlažím)



17.-27. podlaží

Beton: sloupy a stěny $f_{ck} = 25$ MPa; vysoké nosníky $f_{ck} = 30$ MPa;
stropní konstrukce $f_{ck} = 17$ MPa

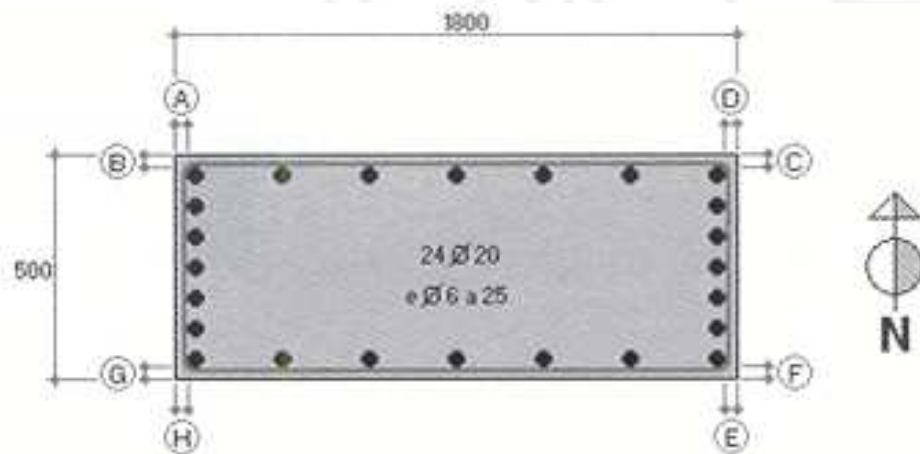
Výztuž: $f_{yk} = 500$ MPa



Sloupy

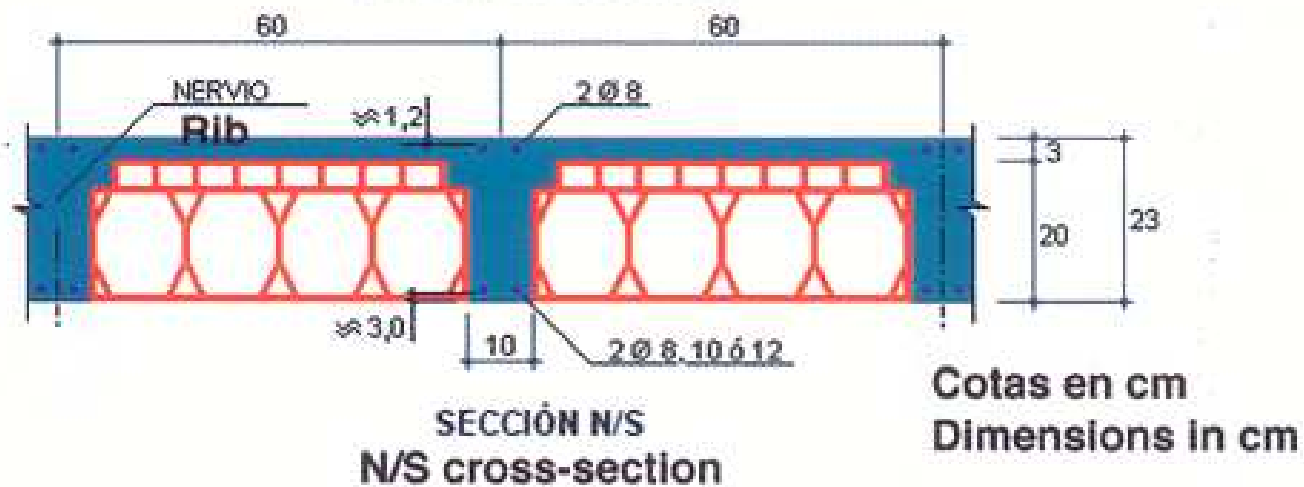
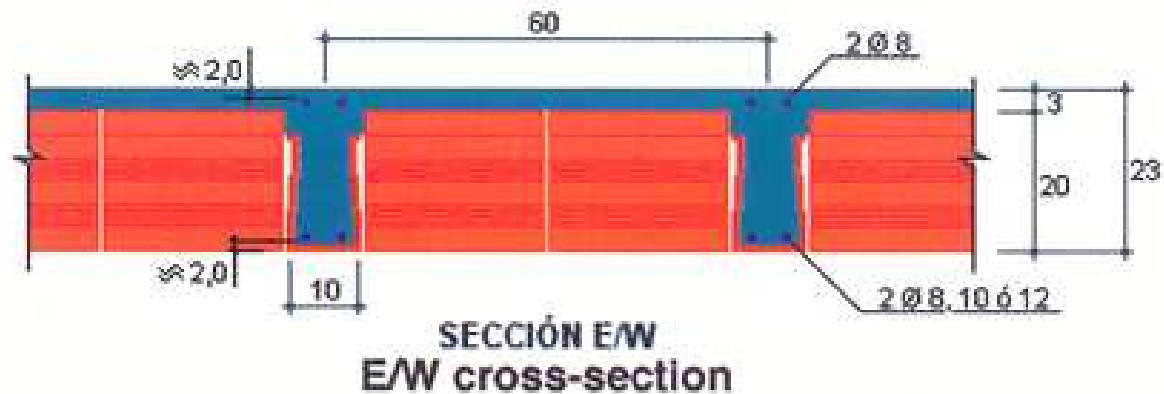
4.-16. podlaží $h = 2200$ mm

17.-27. podlaží $h = 1200$ mm



Fasádní sloupy

$b = 500$ mm, $h = 1800$ mm



Stropní konstrukce

žebrové desky nosné ve dnu směrech - v technických podlažích tloušťka 25 (20+5), v jádru plná deska stejné tloušťky

12. 2 . 2005

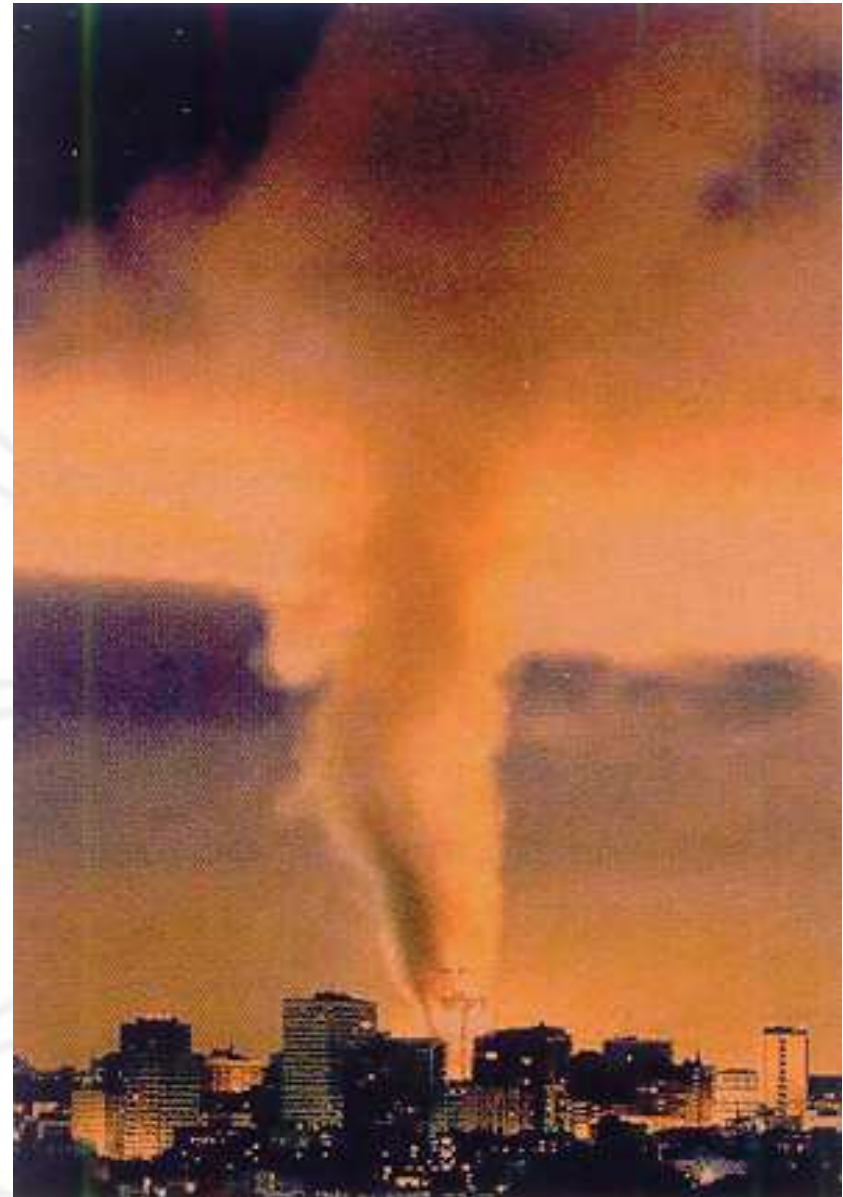
- 23:05 bezpečnostní systém signalizoval požár v 21. podlaží
- 23:25 příjezd hasičů
- 23:25 21. podlaží plně v plamenech

13. 2 . 2005

- 00:20 požár dosáhl 28. podlaží
- 01:00 požár se rozšířil do dolních podlaží
- 01:15 severovýchodní roh budovy se zřítil na horní technické p.
- 03:00 hořící segmenty padaly i vně budovy
- 07:00 požár dosáhl do 5. podlaží

14. 2 . 2005

- 01:00 požár uhašen

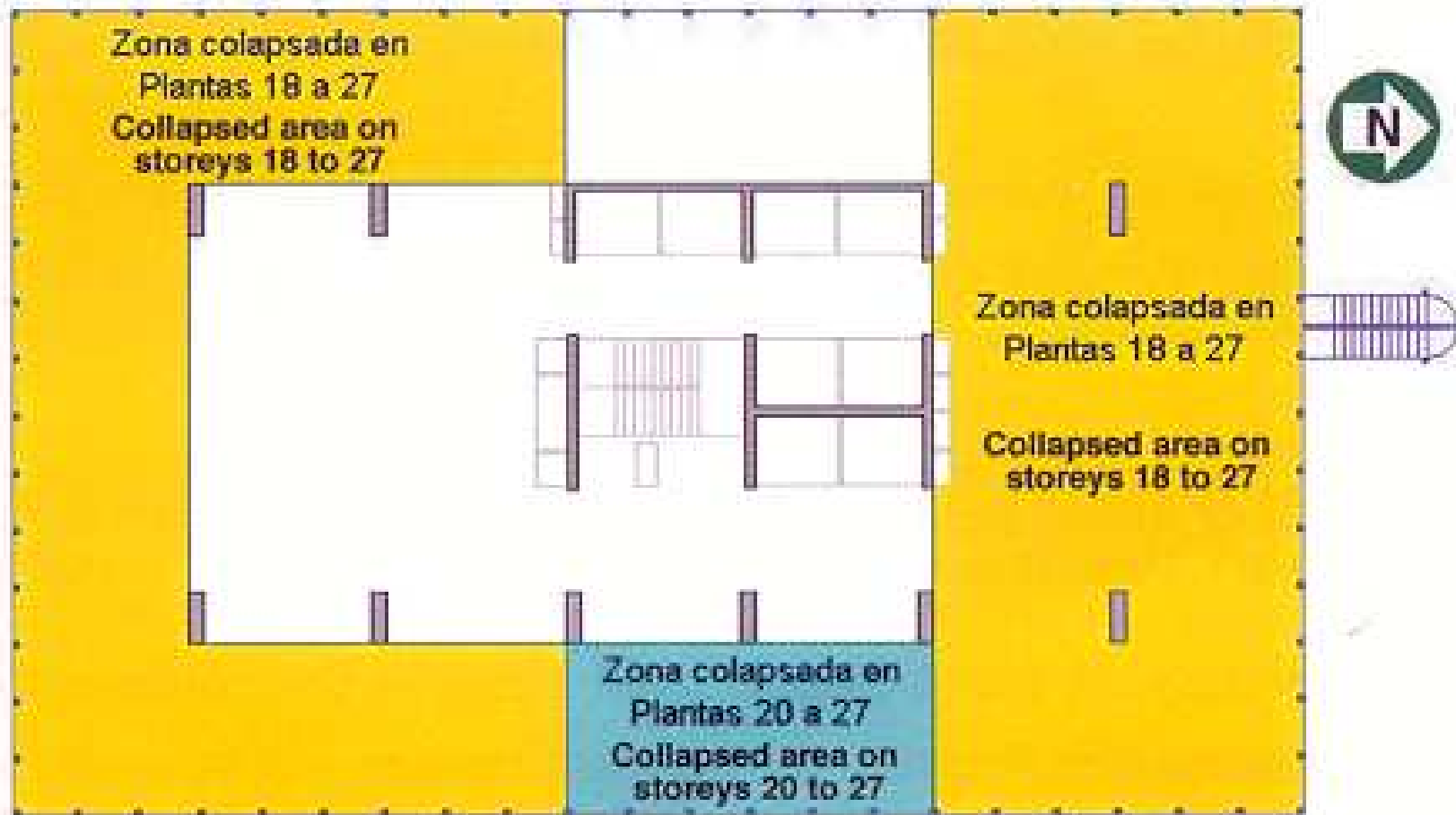




13. 2 . 2005 03:00



budova po požáru



plochy podlaží zřícených na 2. technické podlaží

Následky požáru budovy Windsor Tower

Demolice - nebezpečná operace, třeba stanovit postup

Všeobecná prohlídka budovy 24. 2. 2005 k získání prvotních informací o stavu budovy

Výsledky prohlídky

- Zřícení ocelových sloupů (neochráněných proti požáru) zapříčinilo zřícení přilehlých stropů v 18. - 27. podlaží, 17. podlaží bylo prakticky nepřístupné - sut'
- Všechny zřícené betonové sloupy měly vodorovné trhliny, betonové sloupy v nižších podlažích měly diagonální a svislé trhliny, na kratších straně sloupů odpadla krycí vrstva a někde i vybočila výztuž (přetržení třmínků), schodišťové stěny a jádra výtahů porušeny jen mírně, většina fasádních ocel. sloupů v nižších podl. vybočila

- Ocelové kotevní desky mezi ocelobetonovými spřaženými nosníky byly poškozeny - 56% svarů přerušeno, desky značně deformovány, u několika trámů zjištěna značně nestejná požární ochrana, zčásti se odlupující
- Zavěšené podhledy většinou ve všech podlažích opadaly, uvolnily se a zřítily i keramické vložky
- Po oddělení den keramických vložek odpadla i krycí vrstva výztuže žeber a výztuže, ztratila soudržnost výztuže s betonem
- Skutečnost, že povrch betonu nebyl zbarven kouřem bylo znamením, že krycí vrstva musela odpadnout po požáru při ochlazování konstrukce



Suť propadlá z 18. podl. na 17. podl.

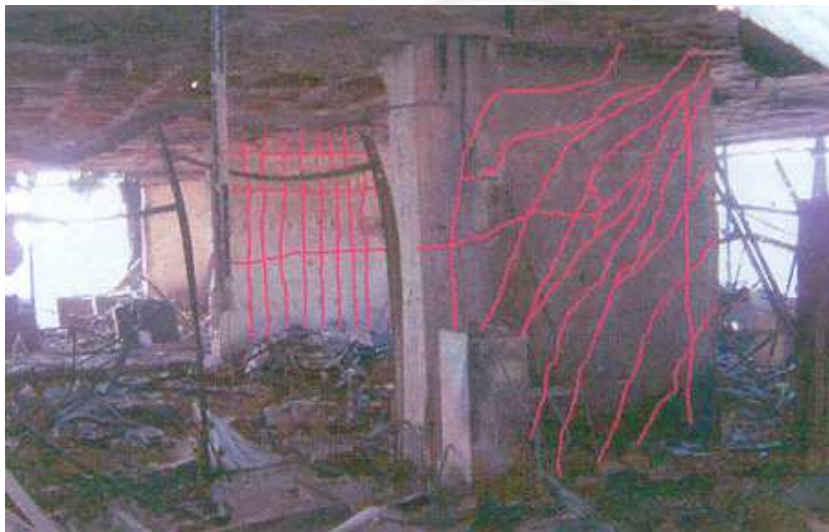


Zbytky zříceného ŽB stropu



Vybočení ocelových sloupů v 9. podlaží, sloupy požárně nechráněny





Trhliny ve sloupech v 16. podlaží



Vybočené pruty v 8. podlaží



Přetržené třmínky



Utržená kotva

17. a 16. podlaží



Porušení ohnivzdor. ochr. spřaž. nosníku



Odpadnutí podhledu a vložek



Odpadnutí podhledu a keram. vložek



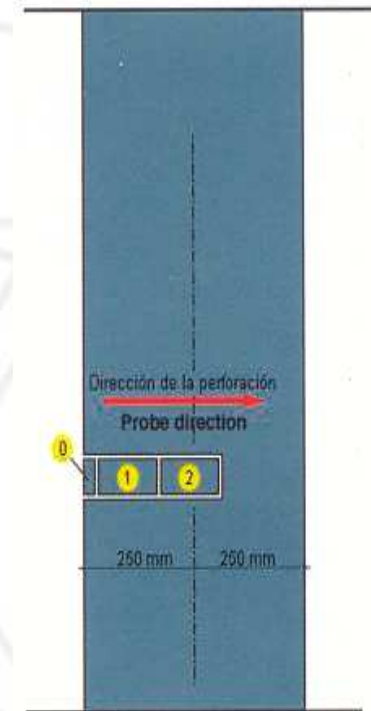
Odpadnutí krycí vrstvy výztuže

Provedené zkoušky a průzkumy

- Zjištění zbytkové pevnosti materiálů k získání údajů pro stanovení bezpečnosti během různých fází demolice budovy
- Staveništní průzkumy: tloušťka krycí vrstvy: hlavní výztuže sloupů a horní výztuže desek, kontrola rozměrů desek
- Ultrazvukové měření: na všech přístupných svislých prvcích a v místech odebraných vývrtů (po mechanických zkouškách pro stanovení závislosti mezi pevností a rychlostí impulzů - porovnání i s betonem nenarušeným požárem)
- Odebírání a zkoušení vývrtů

- Interpretace výsledků zkoušek
 - pevnost - regresní analýza rychlosti impulzů
 - stanovení hloubky poškozeného betonu (pro zjištění ztráty soudržnosti betonu s výztuží) - zkoušky potvrdily dobrou shodu reziduálních pevností při vyšších teplotách betonu s údaji uvedenými v EN 1992-1-1
- Stanovení teploty v požárním úseku bylo provedeno pro dvě extrémní situace: kanceláře bez a se skladovanými spisy a dva scénáře obvodových stěn (porušení 30 a 65 % plochy fasády); skladované spisy a dodávaný kyslík - prudké celkové náhlé vzplanutí, křivka ISO 834

Zkoušení sloupů



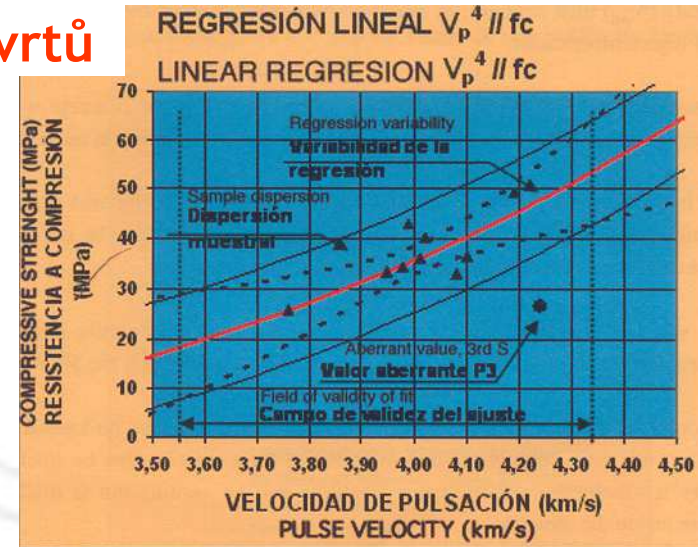


Tlakové zkoušky vzorků

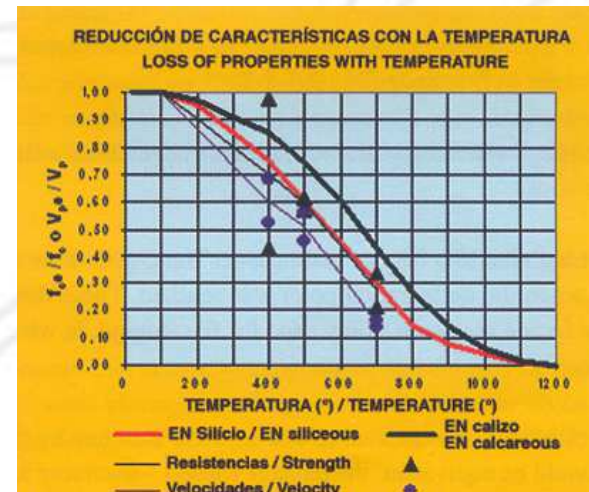
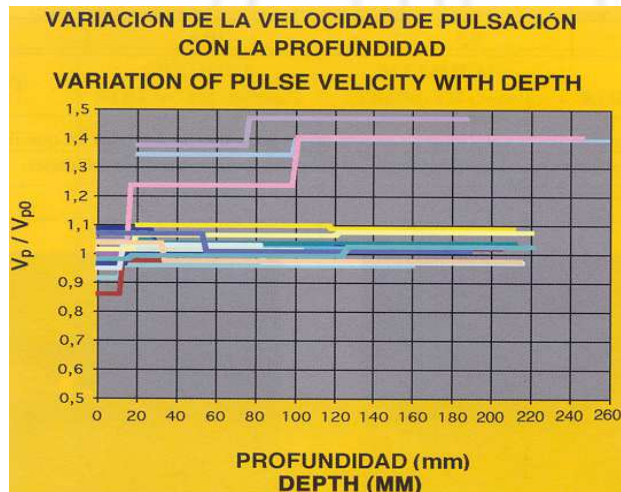


Zkoušky vzorků v požární peci

Dynamické zkoušky vývrtů

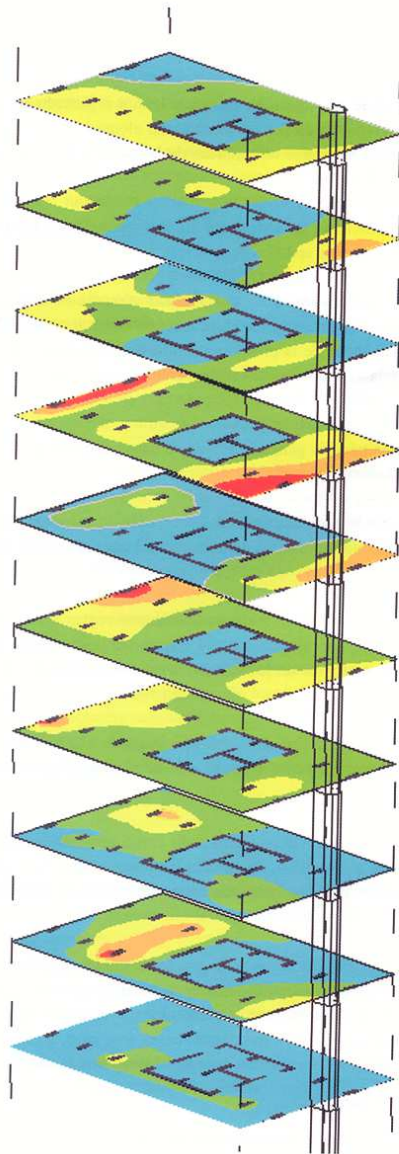


Poměrná změna rychlosti impulzů s hloubkou



Závislost rychlosti impulzů na hloubce

Vliv teploty na rychlost impulzů



Techo de planta 14^a
14th storey ceiling

Techo de planta 13^a
13th storey ceiling

Techo de planta 12^a
12th storey ceiling

Techo de planta 11^a
11th storey ceiling

Techo de planta 10^a
10th storey ceiling

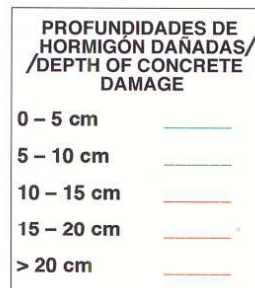
Techo de planta 9^a
9th storey ceiling

Techo de planta 8^a
8th storey ceiling

Techo de planta 7^a
7th storey ceiling

Techo de planta 6^a
6th storey ceiling

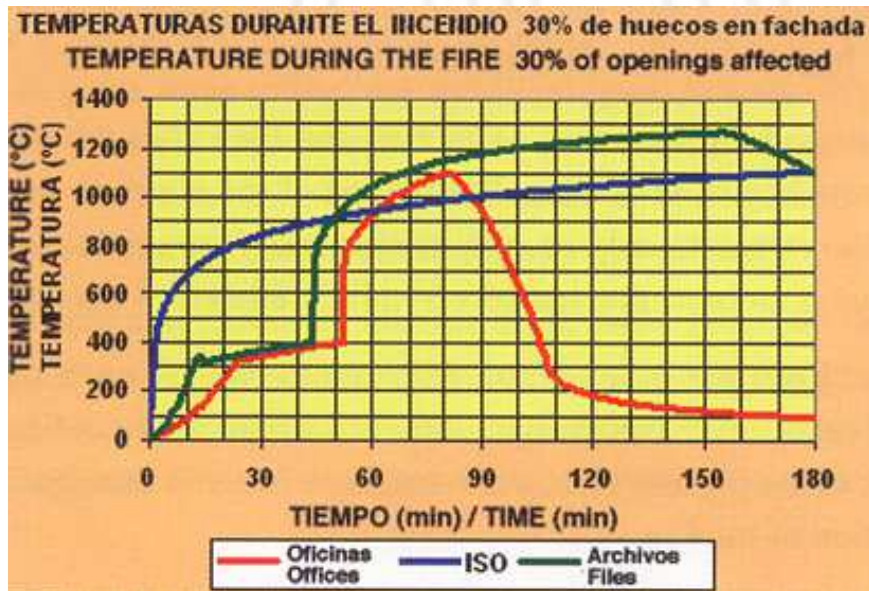
Techo de planta 5^a
5th storey ceiling



Odhad hloubky poškození stropních konstrukcí v 5.-14. podlaží

Teoretická teplota v požárním úseku

65 % otvorů



30 % otvorů

Závěry

Na základě provedených zkoušek a studií bylo možné:

- Stanovit zbytkovou únosnost konstrukce a vhodně rozmístit prostředky k demolici
- Určit rizikové oblasti - práce s nejvyšší opatrností
- Navrhnout a ověřit metody založené na nedestruktivních zkouškách pro stanovení hloubky ve které poškození betonu by mohlo ovlivnit jeho únosnost
- Provedený výzkum ověřil i vhodnost požadavků norem na požární odolnost

Chování betonových a zděných konstrukcí při požáru

Příklady experimentů betonových prvků a konstrukcí

Zkouška požární odolnosti panelu TT



Příklady experimentů betonových prvků a konstrukcí

Zkouška požární
odolnosti stěny



Příklady experimentů betonových prvků a konstrukcí

Ukončení zkoušky
požární odolnosti
stěny



Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu

Budova

- půdorysná plocha 675 m²
- pole 7,5 x 7,5 m
- počet podlaží 7
- požární odolnost 60 minut



Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu

Požární zkouška - 1. podlaží

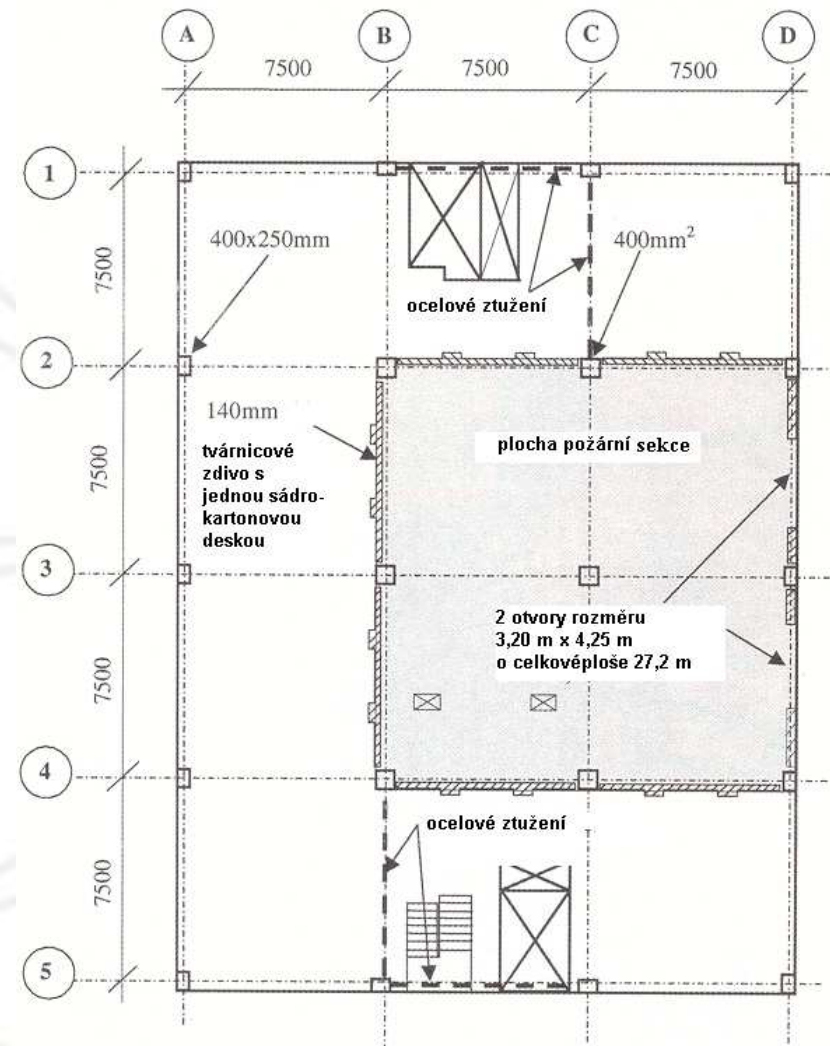
plocha požární sekce 225 m²

stropní deska

- tloušťka 250 mm, krytí 20mm
- beton $f_c = 74$ MPa
- vlhkost 3,8 % hmotnosti
- zatížení nahoře 3,25 kN/m²

sloup

- 0,4m x 0,4 m, 0,4 m x 0,25 m
- světlá výška 4250 mm
- krytí 40 mm
- beton $f_c = 103$ MPa
- polyp. vlákna 2,7 kg/m³
- vlhkost 4,2 % hmotnosti
- přetížení vyvolá sílu $N = 925$ kN



Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



Před požárem - požární zatížení 40 kg/m^2 (720 MJ/m^2),
podepření pro případ havárie - bez dotyku s deskou

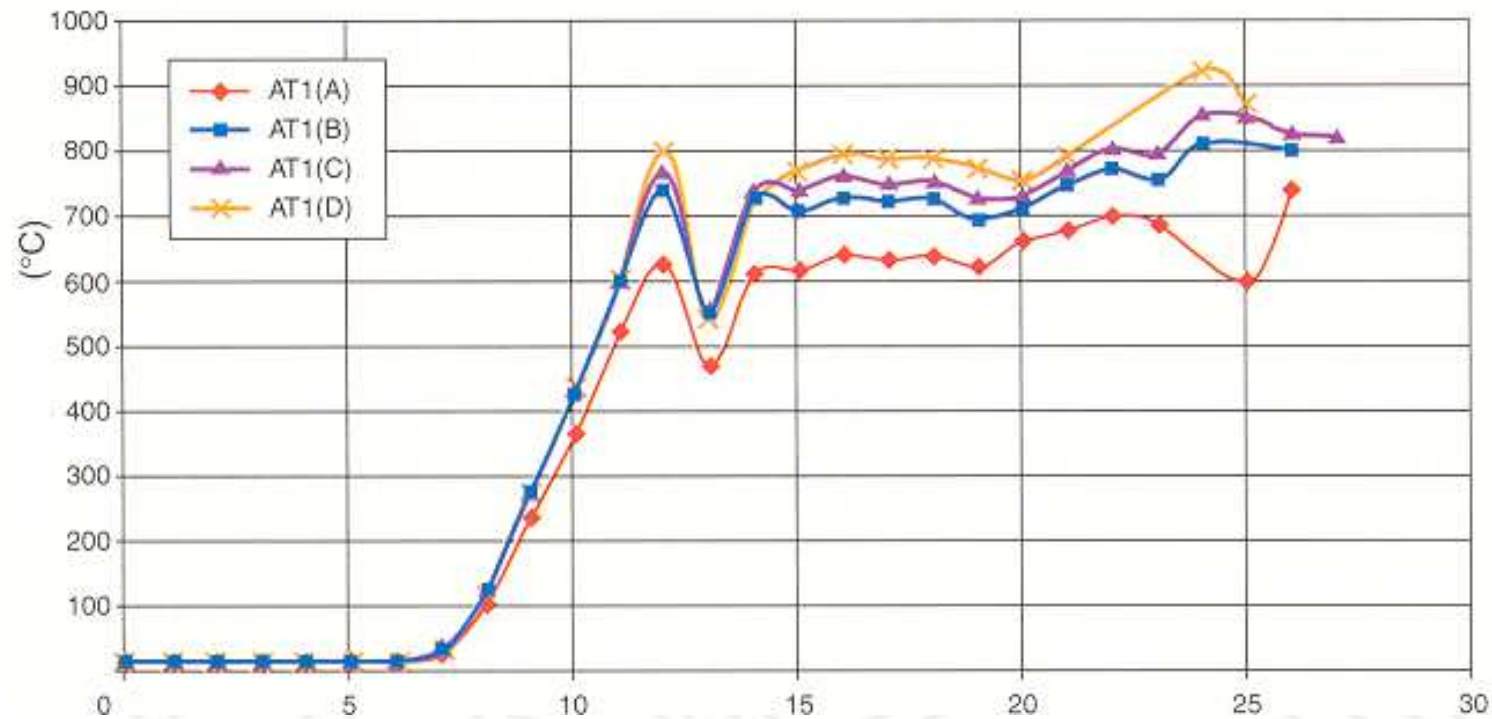
Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu

Plně rozvinutý požár

po 10 min. odštěpování
betonu ze spodního líce
desky



Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



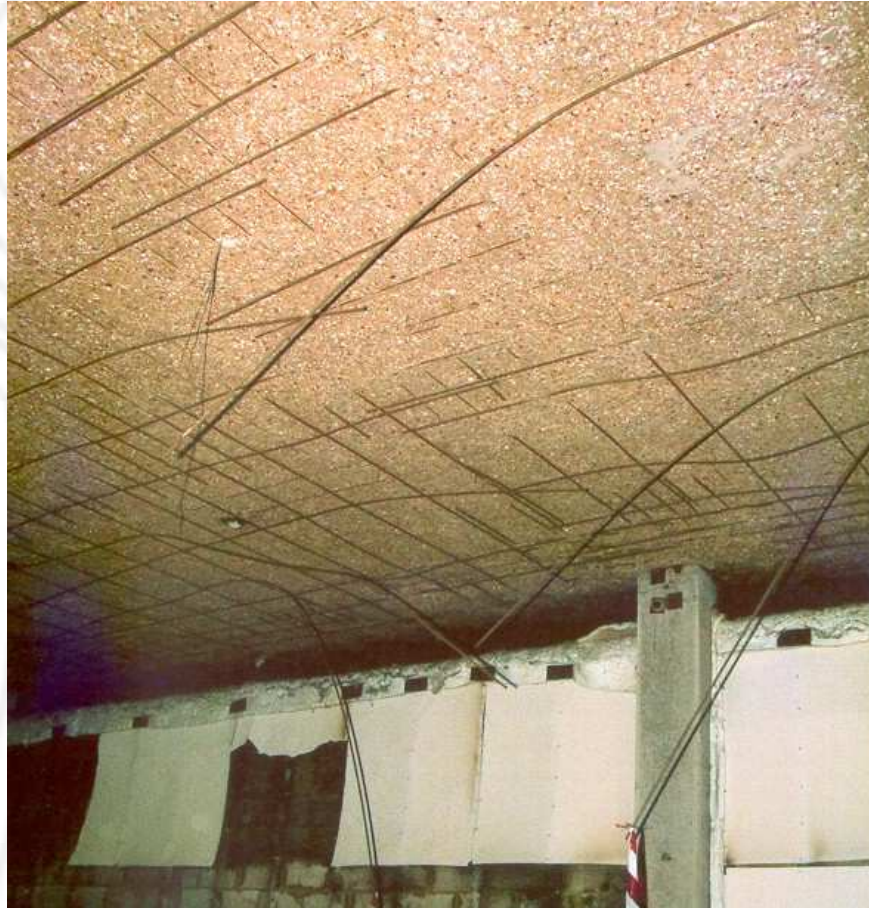
Průběh teploty za požáru

Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



Po požáru - rozsah odštěpení betonu

Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



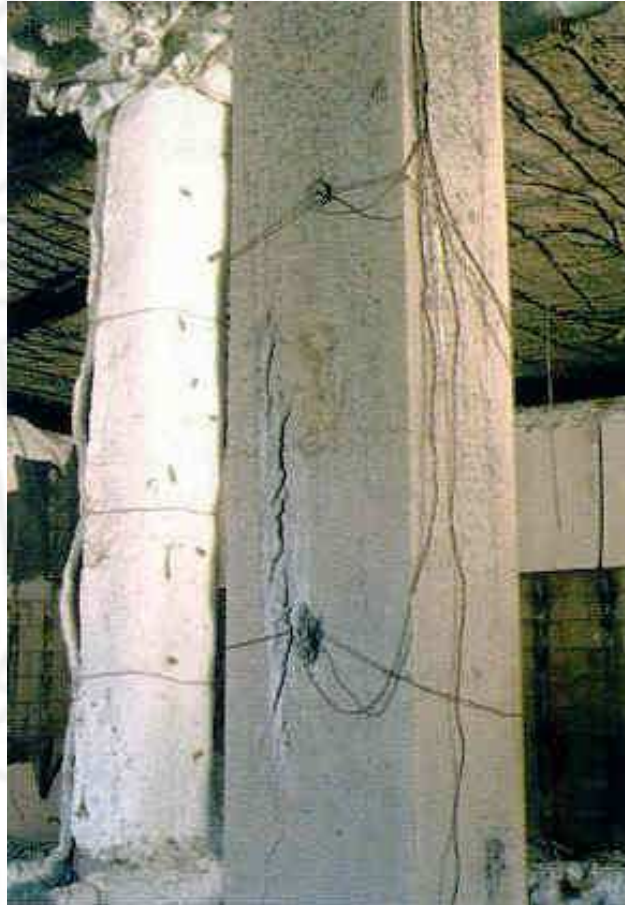
Zkouška požární odolnosti stopní desky

Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



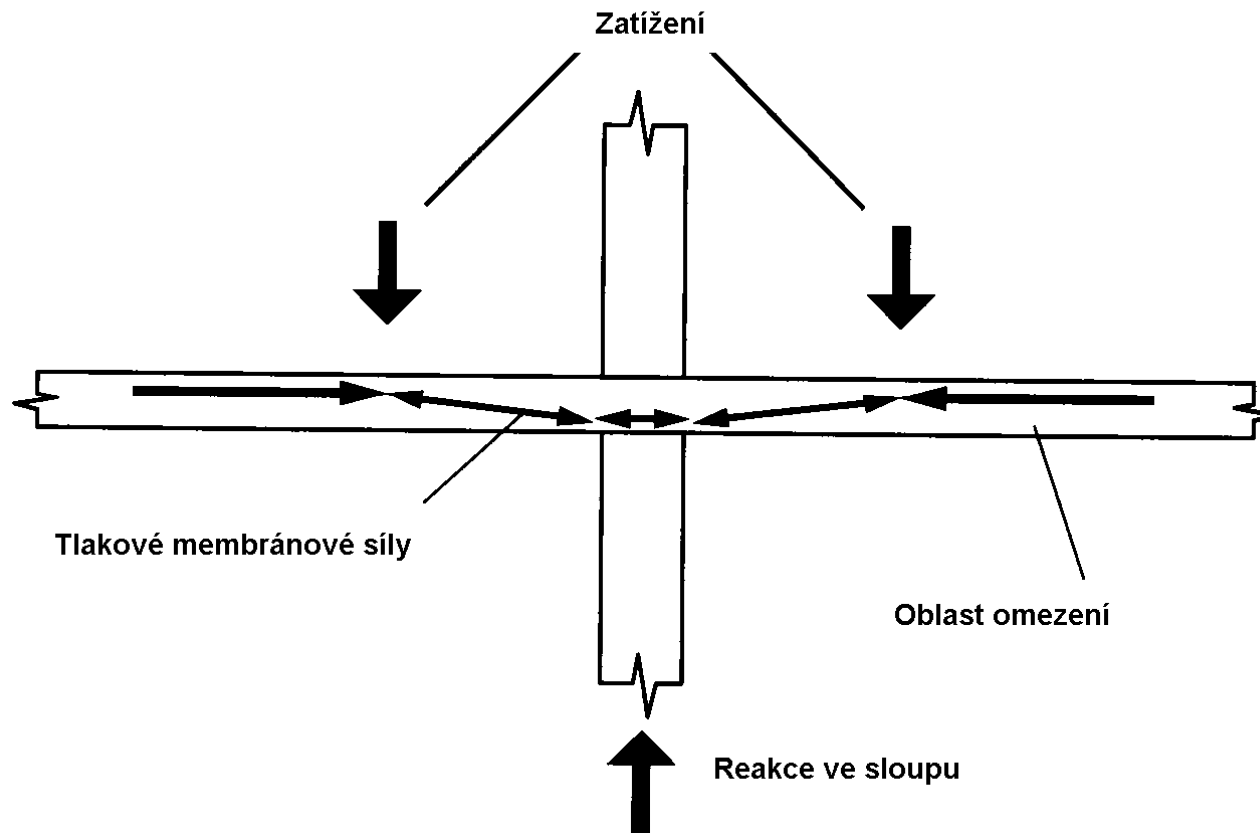
Zkouška požární odolnosti sloupu

Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



Sloup z vysokopevnostního betonu po požáru
beton s přísadou polypropylénových vláken 2,7 kg/m² betonu

Požární zkouška betonové konstrukce v Cardingtonu



Tlakové membránové působení

Vlastnosti betonu a výztuže při zvýšených teplotách

Beton

- Procesy a změny v betonu při vystavení požáru
- Mechanické vlastnosti betonu
- Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Výztuž

- Mechanické vlastnosti výztuže
- Teplotní a fyzikální vlastnosti výztuže

Beton

- Nechořlavý materiál.
- Ve srovnání s jinými stavebními materiály má vynikající vlastnosti z hlediska požární odolnosti.
- Přesto je chování betonu (resp. betonových a železobetonových konstrukcí) působením požáru negativně ovlivněno.
- Při vystavení zvýšeným teplotám dochází v betonu k mechanickým, fyzikálním a chemickým procesům vedoucím k nevratným změnám jeho vlastností.

Beton

θ [°C]

Procesy a změny v betonu při vystavení požáru

[1-2,7-10]

20-100

Dochází k hydrataci (přeměna volné vody v chemicky vázanou). Vznik CSH a Ca(OH)_2 .

100

Začíná dehydratace cementového tmelu - uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.

150

Vrcholí první fáze rozkladu CSH.

200+

Dochází k uvolňování vázané vody.

300+

Pokračuje rozklad CSH a Ca(OH)_2 za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.

Beton

550-600

Dochází k fázové změně křemene z triklinické soustavy na soustavu hexagonální. To vede společně s vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cement. tmelem.

700-750

Vrcholí druhá fáze rozkladu CSH.

800+

Hydraulické vazby v cementovém tmelu přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při které vzniká CO_2 .

900

Totální dekompozice cementového tmelu.

1000+

Začíná tavení některých složek betonu.

1200+

Celkové tavení materiálu.

Beton

Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu v závislosti na teplotě podle ČSN EN 1992-1-2

- Hodnoty vlastností založeny na zkouškách při rychlosti zahřívání $2-50 \text{ K min}^{-1}$ (~ odpovídá normovému požáru).
- Při dlouhodobém vystavení zvýšené teplotě mohou být vlastnosti jiné.

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Lze určit z pracovního diagramu charakterizovaného

- tabulkovými hodnotami $f_{ck,\theta}$ (resp. $f_{ck,\theta}/f_{ck}$), $\varepsilon_{c1,\theta}$, $\varepsilon_{cu1,\theta}$
- pro vzestupnou větev (oblast $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta}$) vztahem

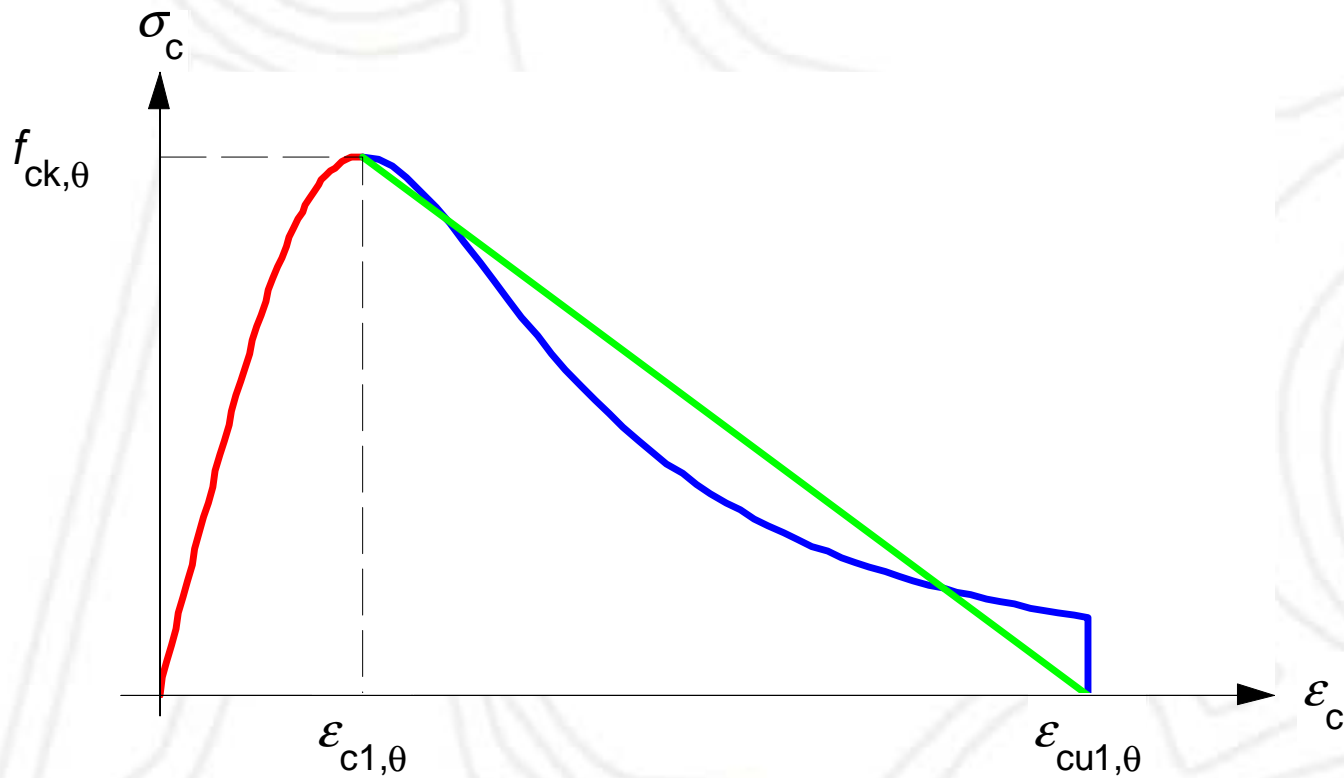
$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = \frac{3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{ck,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$$

- pro sestupnou větev (oblast $\varepsilon_{c1,\theta} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$) lineárním poklesem nebo výše uvedeným vztahem

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Model pracovního diagramu betonu v tlaku při zvýšených teplotách



Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu při zvýšených teplotách dle ČSN EN 1992-1-2

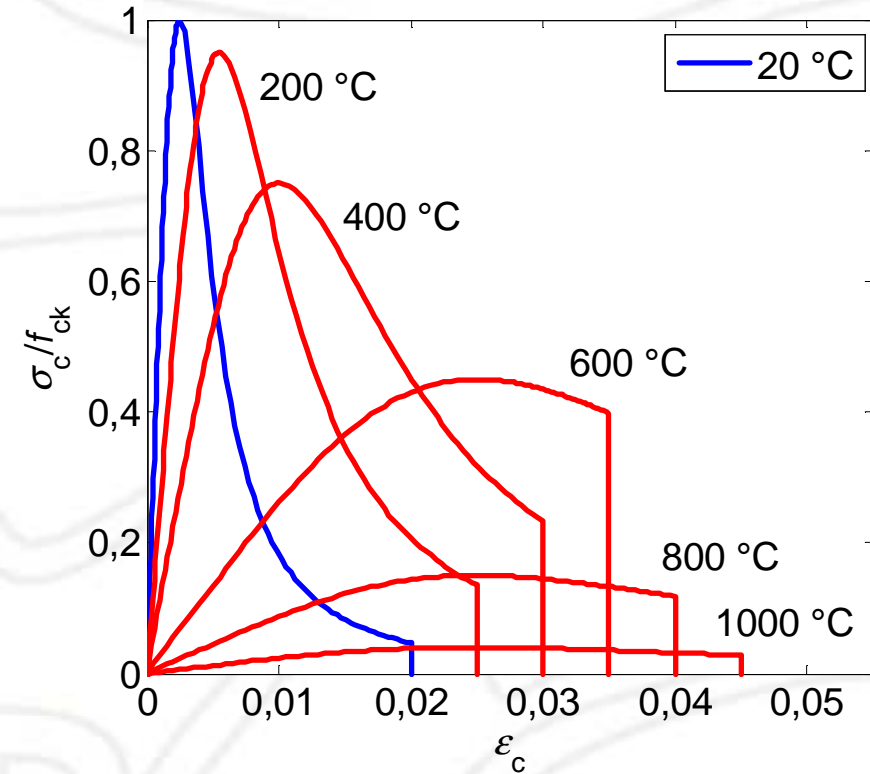
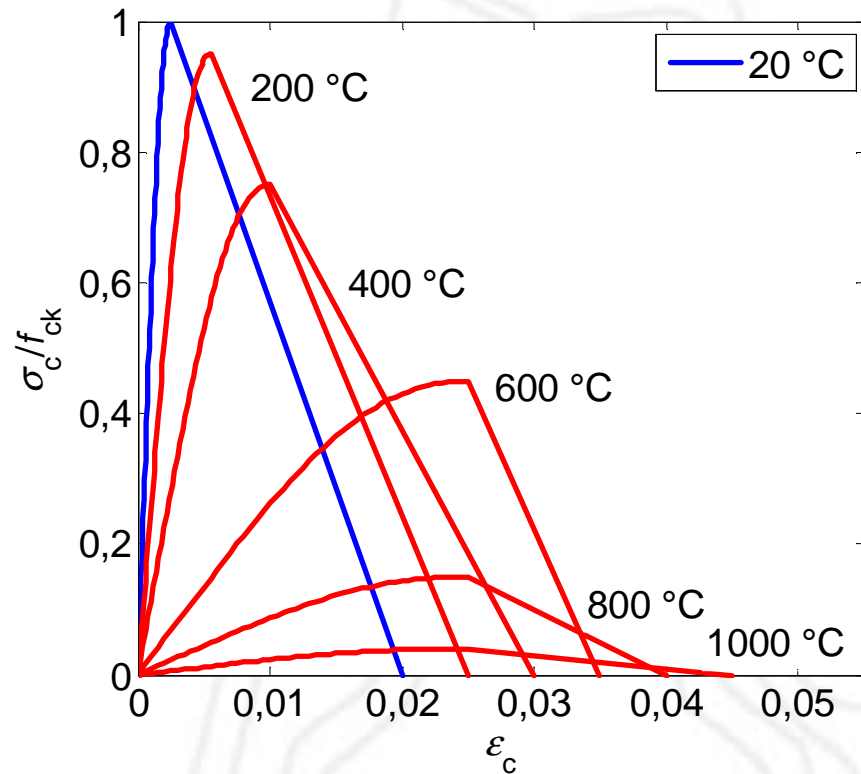
Teplota θ [°C]	Beton s křemičitým kamenivem			Beton s vápencovým kamenivem		
	$f_{ck,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{ck,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Beton

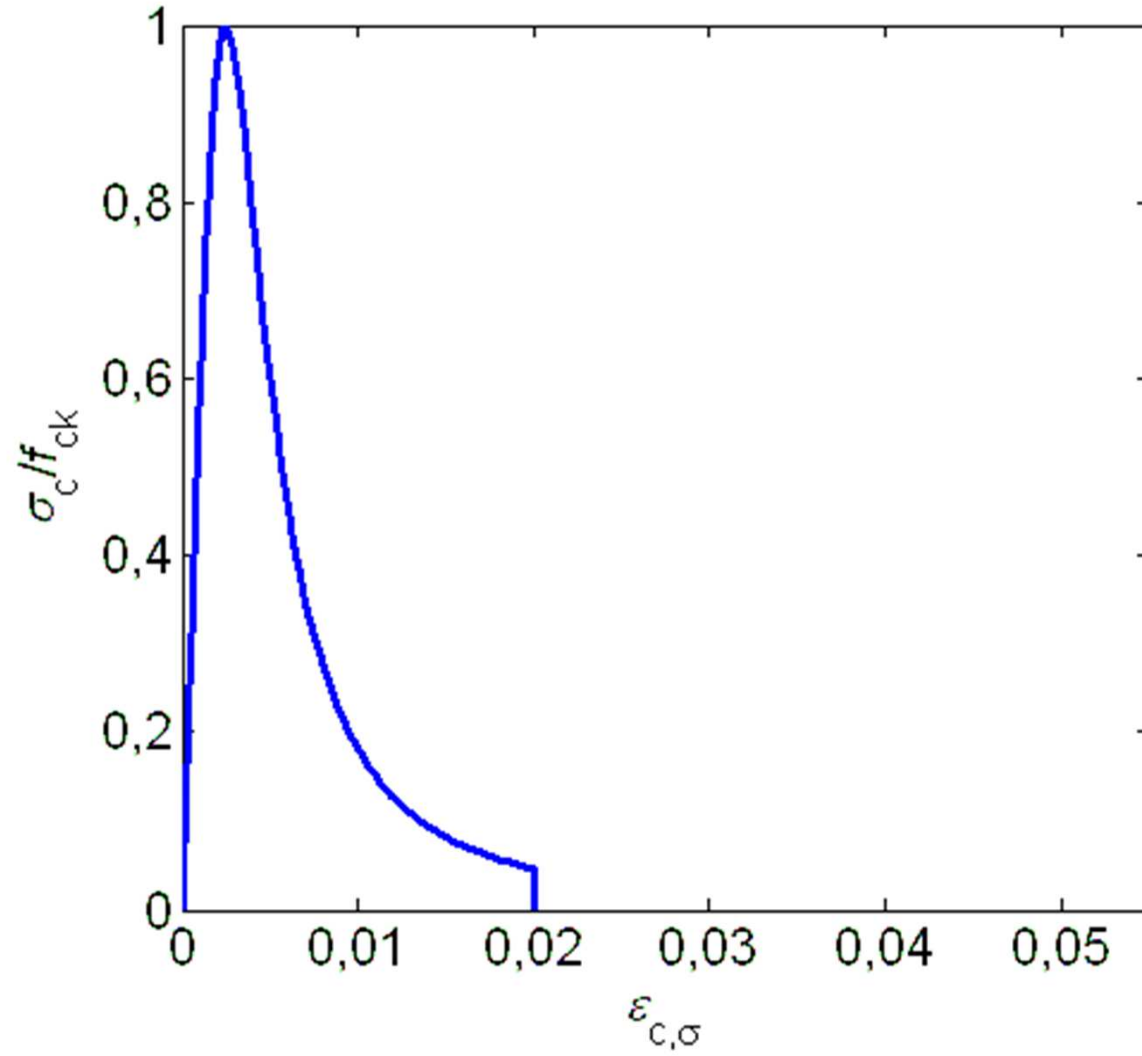
Mechanické vlastnosti betonu

Obyčejný beton s křemičitým kamenivem:
lineární model sestupné větve

nelineární model sestupné větve



$\theta_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Beton

Mechanické vlastnosti betonu

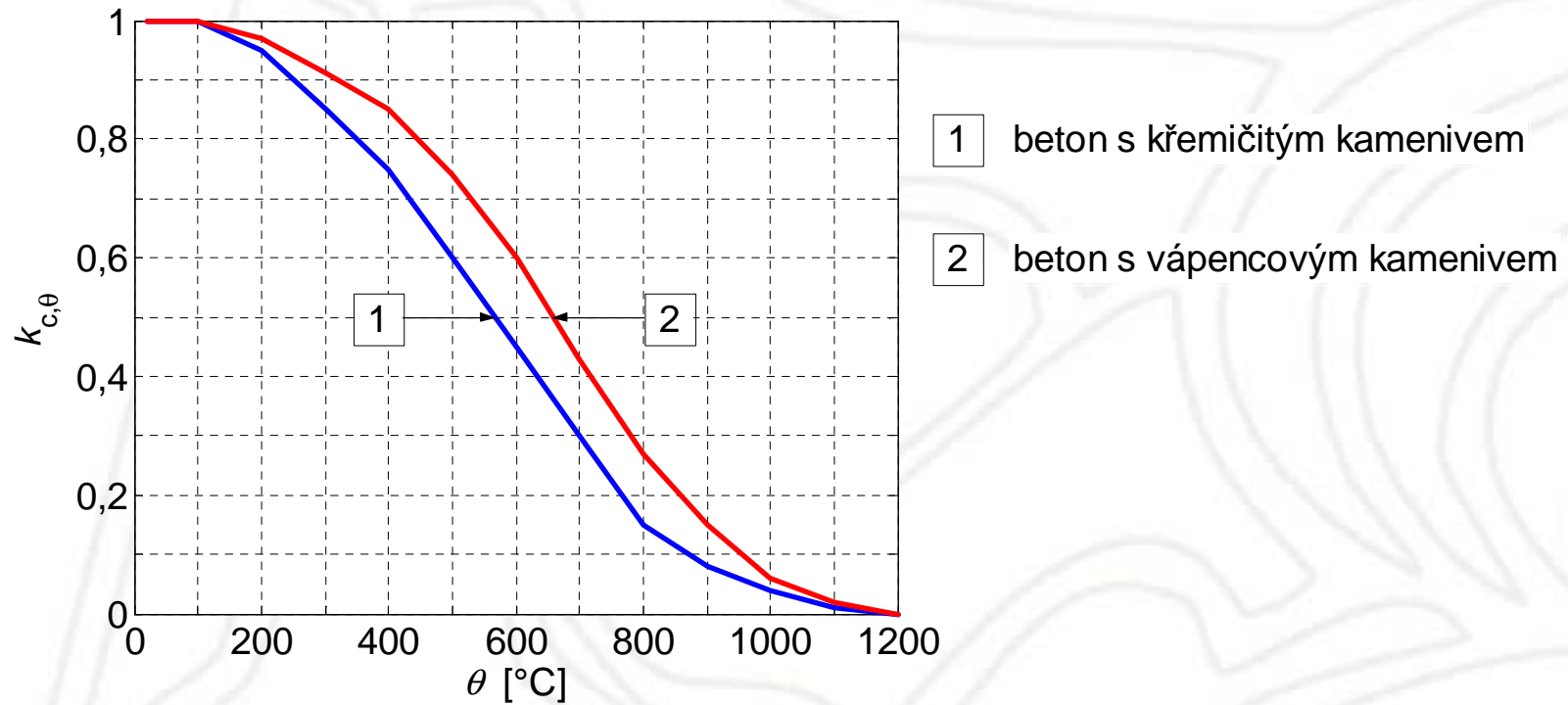
- Poměr $f_{ck,\theta}/f_{ck}$ uvedený v tabulce označujeme $k_{c,\theta}$ - součinitel pro redukci charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tlaku.
- Platí:

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck}$$

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Součinitel $k_{c,\theta}$ pro redukci charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tlaku při zvýšených teplotách



Beton

Mechanické vlastnosti betonu

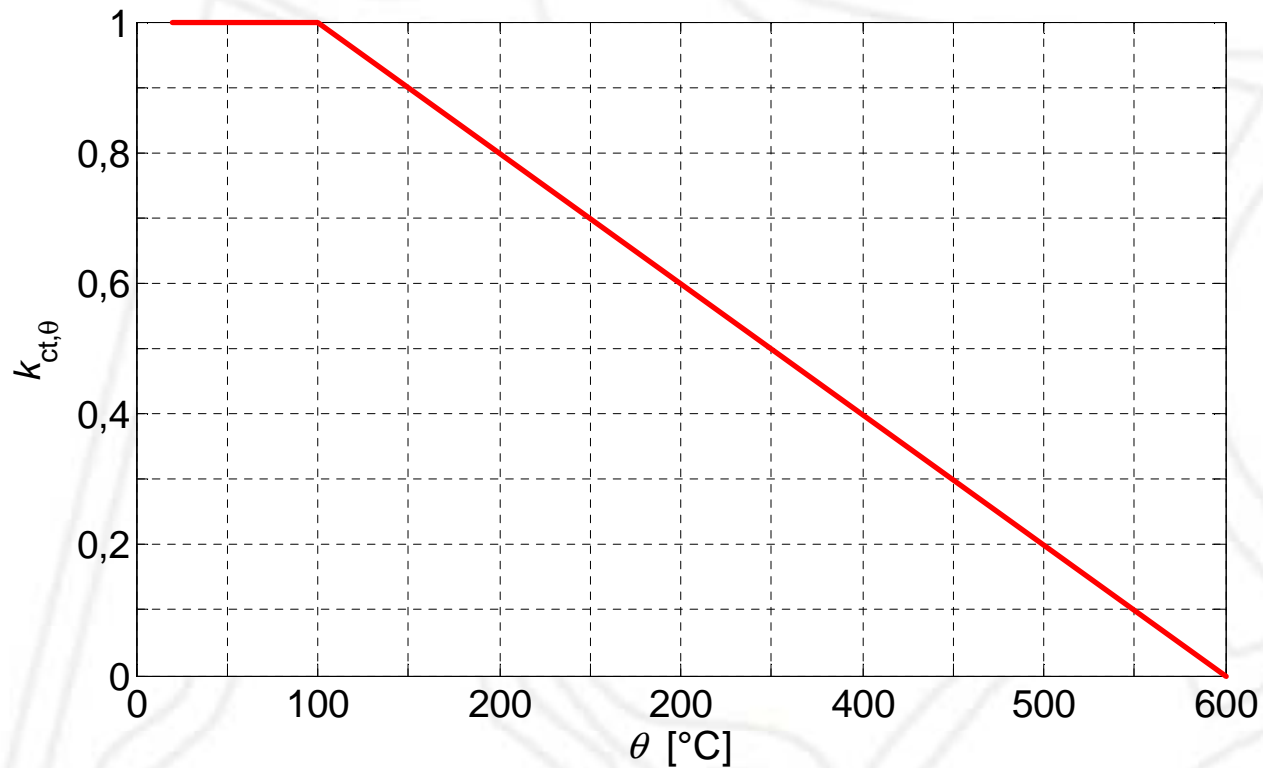
- Pevnost betonu v tahu se obvykle zanedbává.
- Pokud má být při použití zjednodušených nebo zpřesněných metod výpočtu požární odolnosti uvažována, lze ji stanovit pomocí redukčního součinitele $k_{ct,\theta}$

$$f_{ctk,\theta} = k_{ct,\theta} \cdot f_{ctk}$$

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Součinitel $k_{ct,\theta}$ pro redukci charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tahu při zvýšených teplotách



Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Shrnutí - Norma udává:

- Hodnoty pevností: $f_{ck,\theta}$ a $f_{ctk,\theta}$
(resp. jejich poměr k pevnostem při běžné teplotě)
- Velikosti přetvoření $\varepsilon_{c1,\theta}$ a $\varepsilon_{cu1,\theta}$
- Vztah popisující pracovní diagram betonu

$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = 3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{ck,\theta} / \left(\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right) \right)$$

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

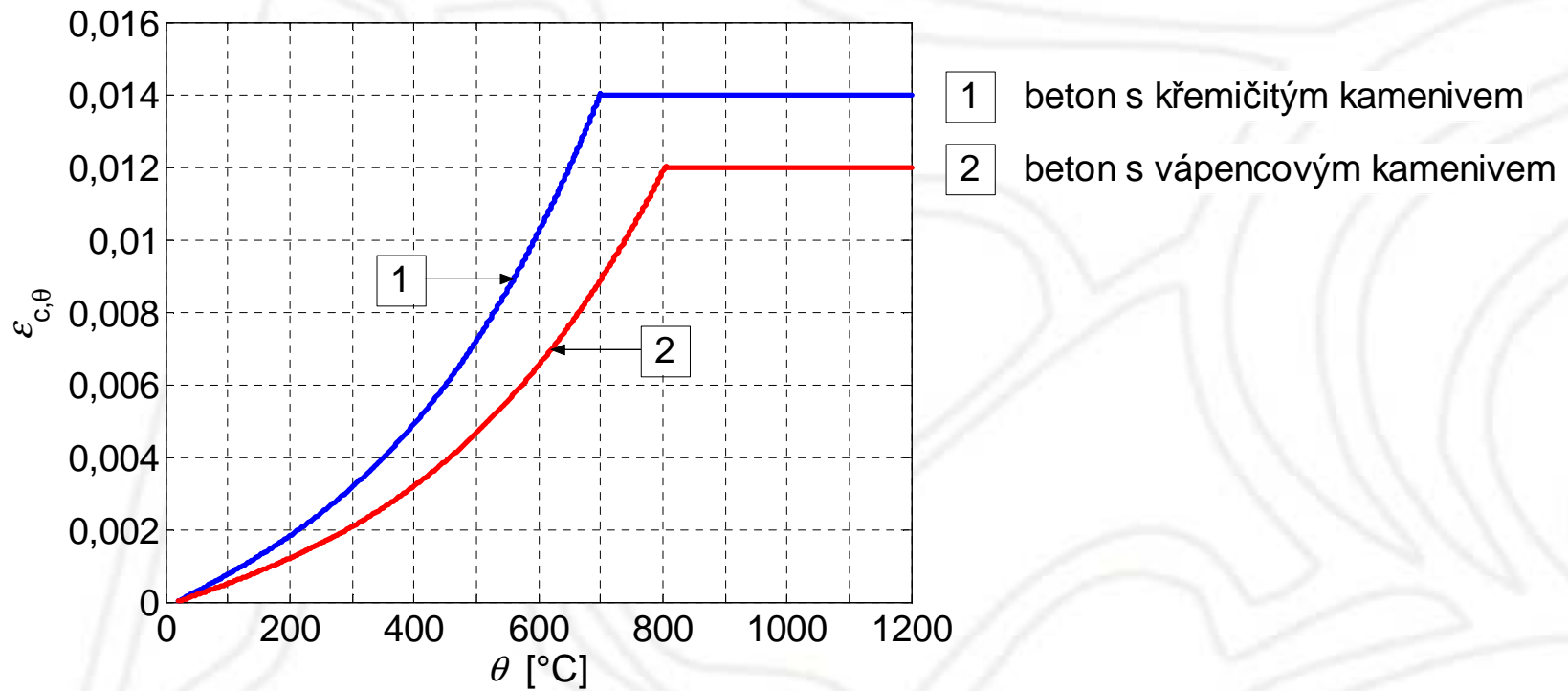
Norma udává vztahy vyjadřující teplotní závislost

- teplotního poměrného přetvoření betonu
- měrné tepelné kapacity betonu
- objemové hmotnosti betonu
- tepelné vodivosti betonu

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Teplotní poměrné přetvoření betonu $\varepsilon_{c,\theta}$ ve vztahu k délce při 20 °C



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Teplotní poměrné přetvoření betonu

- Beton s křemičitým kamenivem

$$20\text{ °C} \leq \theta \leq 700\text{ °C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3$$

$$700\text{ °C} < \theta \leq 1200\text{ °C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = 14 \cdot 10^{-3}$$

- Beton s vápencovým kamenivem

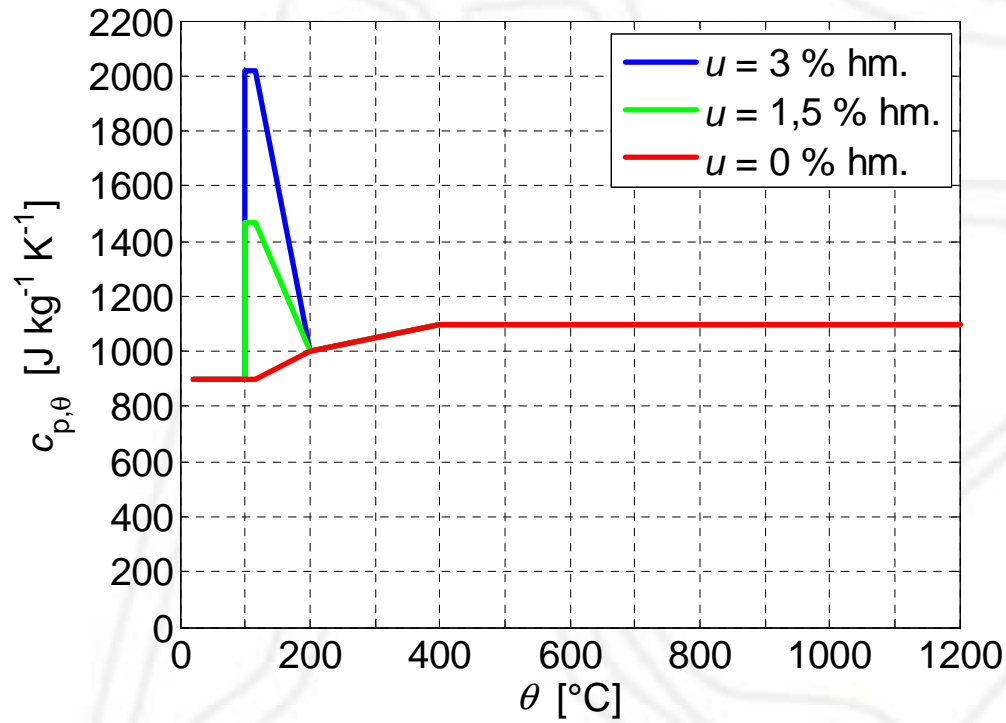
$$20\text{ °C} \leq \theta \leq 805\text{ °C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = -1,2 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3$$

$$805\text{ °C} < \theta \leq 1200\text{ °C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = 12 \cdot 10^{-3}$$

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Měrná tepelná kapacita betonu $c_{p,\theta}$



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

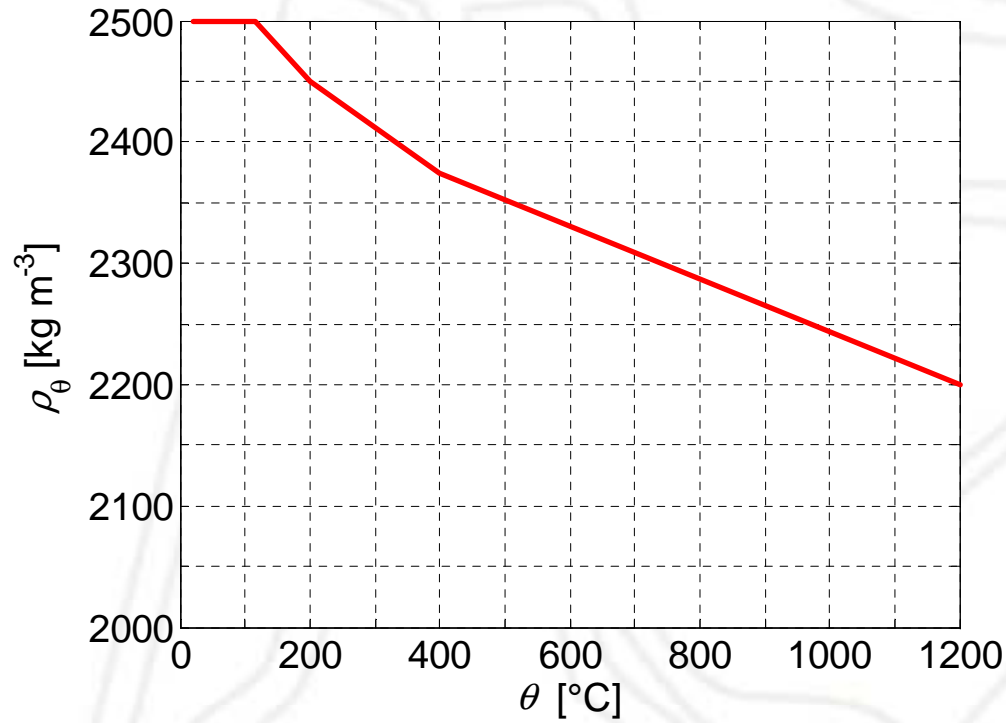
Měrná tepelná kapacita betonu

- Závisí na vlhkosti betonu.
- Norma udává hodnoty měrné tepelné kapacity pro beton s vlhkostí 0, 1,5 a 3 % hmotnosti betonu.
- To zjednodušeně umožňuje zohlednit vliv vlhkosti a jejího transportu, aniž by byl uvažován model sdruženého vedení tepla a vlhkosti.

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Objemová hmotnost betonu ρ_θ , $\rho_{20^\circ\text{C}} = 2500 \text{ kg m}^{-3}$



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Objemová hmotnost betonu

- Pokles je způsoben ztrátou volné i vázané vody.

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{pro } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(1 - 0,02 \cdot \frac{\theta - 115}{85} \right)$$

$$\text{pro } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(0,98 - 0,03 \cdot \frac{\theta - 200}{200} \right)$$

$$\text{pro } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

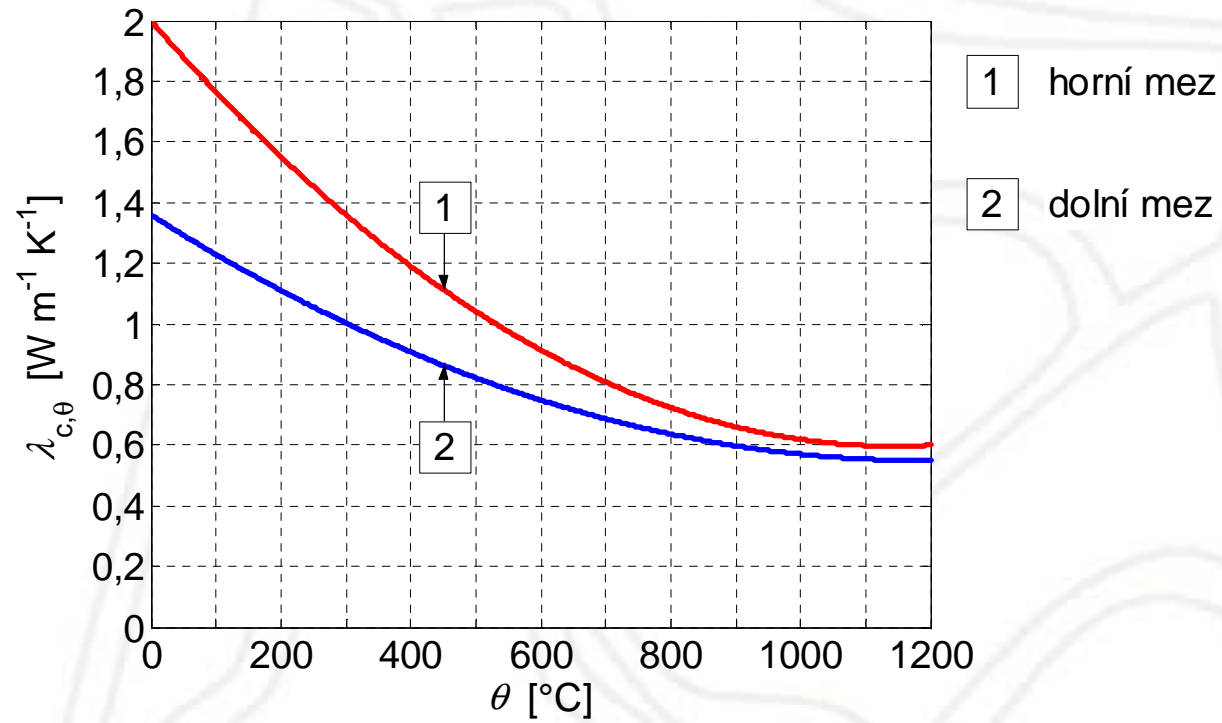
$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(0,95 - 0,07 \cdot \frac{\theta - 400}{800} \right)$$

$$\text{pro } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Tepelná vodivost betonu $\lambda_{c,\theta}$



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Tepelná vodivost betonu

- Horní mez

$$\lambda_{c,\theta} = 2 - 0,2451 \cdot \frac{\theta}{100} + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$$

- Dolní mez

$$\lambda_{c,\theta} = 1,36 - 0,136 \cdot \frac{\theta}{100} + 0,0057 \cdot \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

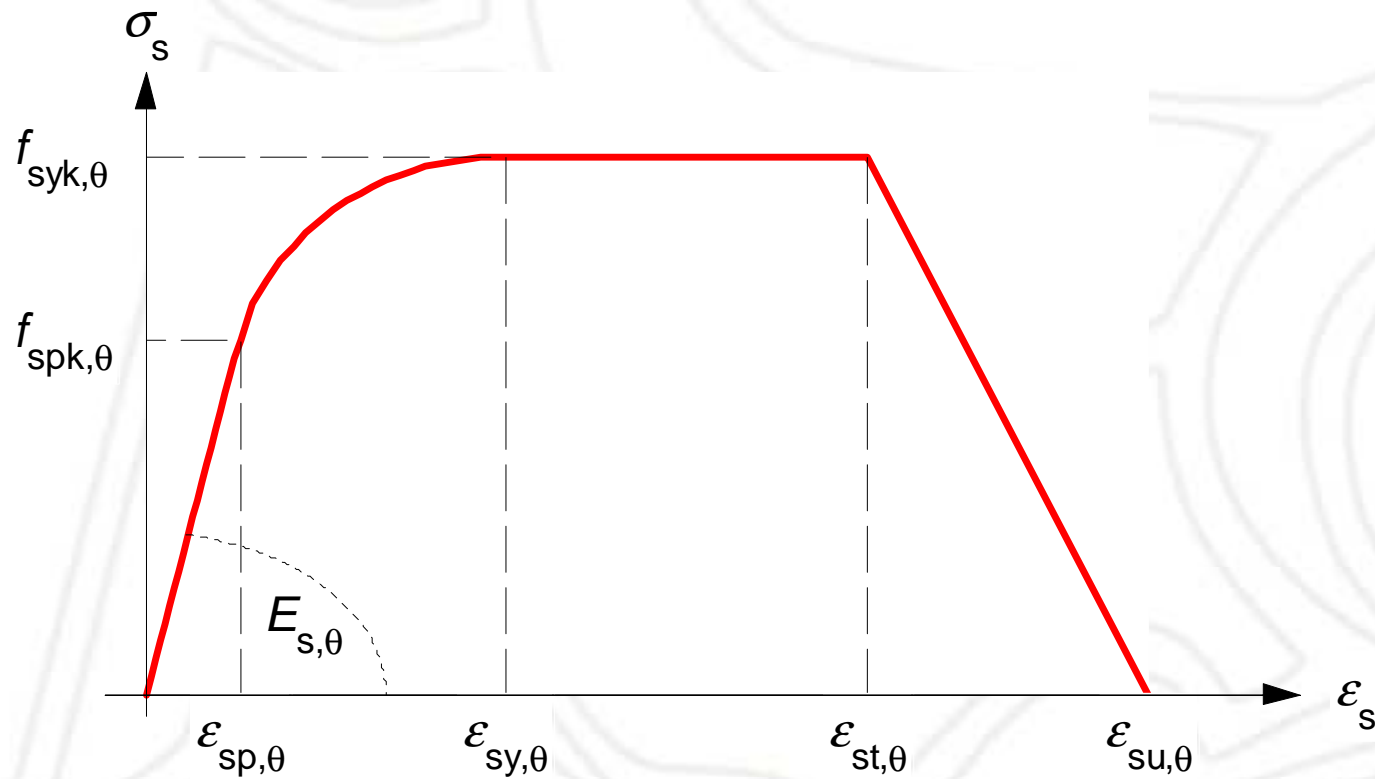
Výztuž

- Vliv zvýšených teplot na strukturu oceli a na změnu jejích vlastností - viz předměty katedry 134.
- Norma ČSN EN 1992-1-2 rozlišuje vlastnosti betonářské a předpínací výztuže.
- Zde se budeme zabývat pouze výztuží betonářskou. Pro předpínací výztuž se index „s“ v označení jednotlivých veličin (pevnost, přetvoření, ...) nahradí indexem „p“.

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Model pracovního diagramu betonářské výztuže při zvýšených teplotách



Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Lze určit z pracovního diagramu charakterizovaného

- sklonem v lineárně pružné oblasti $E_{s,\theta}$
- charakteristickou hodnotou meze úměrnosti $f_{spk,\theta}$
- maximálním napětím $f_{syk,\theta}$
- poměrnými přetvořeními $\epsilon_{s_,\theta}$
(index „_“ vyjadřuje „p“, „y“, „t“, „u“)
- vztahy popisujícími jednotlivé oblasti diagramu
(vztahy - viz skripta [1] nebo norma [5])

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

- Poměrná přetvoření $\varepsilon_{s,\theta}$

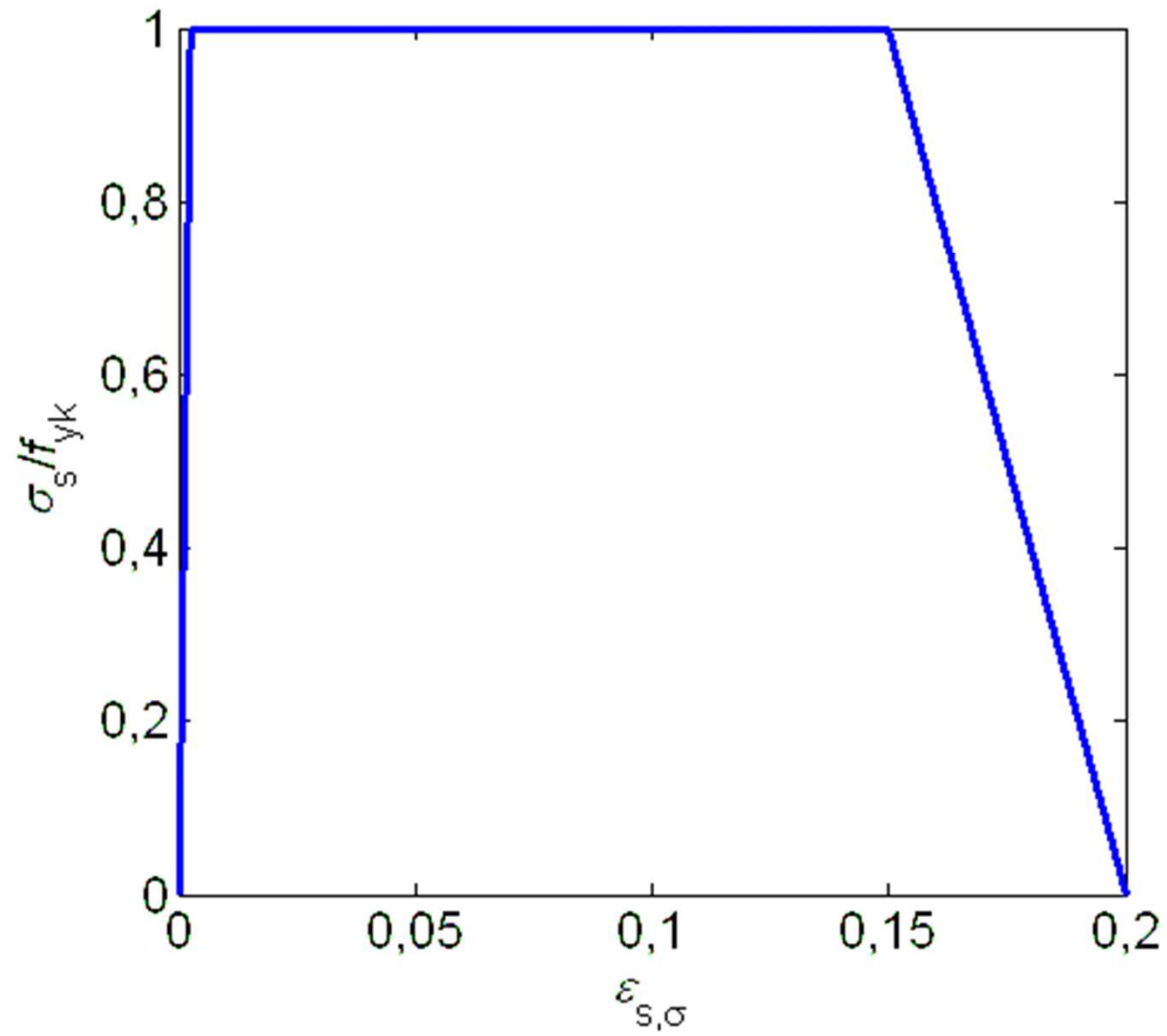
	$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon_{sy,\theta}$	$\varepsilon_{st,\theta}$	$\varepsilon_{su,\theta}$
Výztuž třídy A	$f_{spk,\theta}/E_{s,\theta}$	0,02	0,05	0,10
Výztuž třídy B a C	$f_{spk,\theta}/E_{s,\theta}$	0,02	0,15	0,20
Třídy tažnosti výztuže A, B, C jsou definovány v normě ČSN EN 1992-1-1.				

- Ostatní parametry pracovního diagramu betonářské výztuže jsou v normě udány ve dvou třídách - N a X.
- V ČR se běžně uvažuje třída N.

Třída N hodnot parametrů pracovního diagramu betonářské výztuže při zvýšených teplotách

Teplota θ [°C]	$f_{syk,\theta}/f_{yk}$		$f_{spk,\theta}/f_{yk}$		$E_{s,\theta}/E_s$	
	Výztuž válcovaná za tepla	Výztuž tvářená za studena	Výztuž válcovaná za tepla	Výztuž tvářená za studena	Výztuž válcovaná za tepla	Výztuž tvářená za studena
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

$\theta_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Výztuž

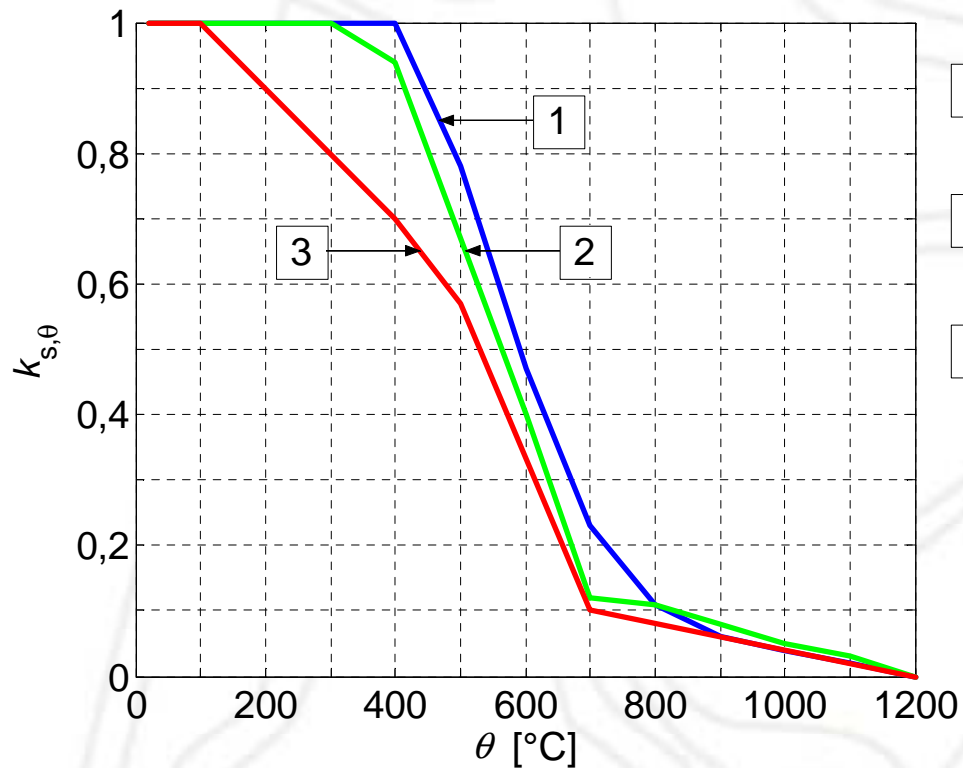
Mechanické vlastnosti výztuže

- Poměr $f_{syk,\theta}/f_{yk}$, uvedený v tabulce označujeme $k_{s,\theta}$ - součinitel pro redukci charakteristické hodnoty meze kluzu betonářské výztuže.
- Platí:
$$f_{syk,\theta} = k_{s,\theta} \cdot f_{yk}$$
- Hodnoty $k_{s,\theta}$ z tabulky platí pro tahovou výztuž třídy N, pro kterou platí $\varepsilon_{s,fi} \geq 2 \%$.
- Pro tlakovou výztuž ve sloupech a tlačných oblastech trámů a desek se hodnoty součinitele $k_{s,\theta}$ určí ze vztahů:

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Součinitel $k_{s,\theta}$ pro redukci charakteristické hodnoty meze kluzu (f_{yk}) tahové a tlakové výztuže třídy N



- 1 tahová výztuž válcovaná za tepla při poměrném přetvoření $\varepsilon_{s,fi} \geq 2 \%$
- 2 tahová výztuž tvářená za studena při poměrném přetvoření $\varepsilon_{s,fi} \geq 2 \%$
- 3 tlaková a tahová výztuž při poměrném přetvoření $\varepsilon_{s,fi} < 2 \%$

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

$$k_{s,\theta} = 1,0$$

pro $20\text{ °C} \leq \theta \leq 100\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,7 - 0,3 \cdot \frac{\theta - 400}{300}$$

pro $100\text{ °C} < \theta \leq 400\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,57 - 0,13 \cdot \frac{\theta - 500}{100}$$

pro $400\text{ °C} < \theta \leq 500\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,1 - 0,47 \cdot \frac{\theta - 700}{200}$$

pro $500\text{ °C} < \theta \leq 700\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,1 \cdot \frac{1200 - \theta}{500}$$

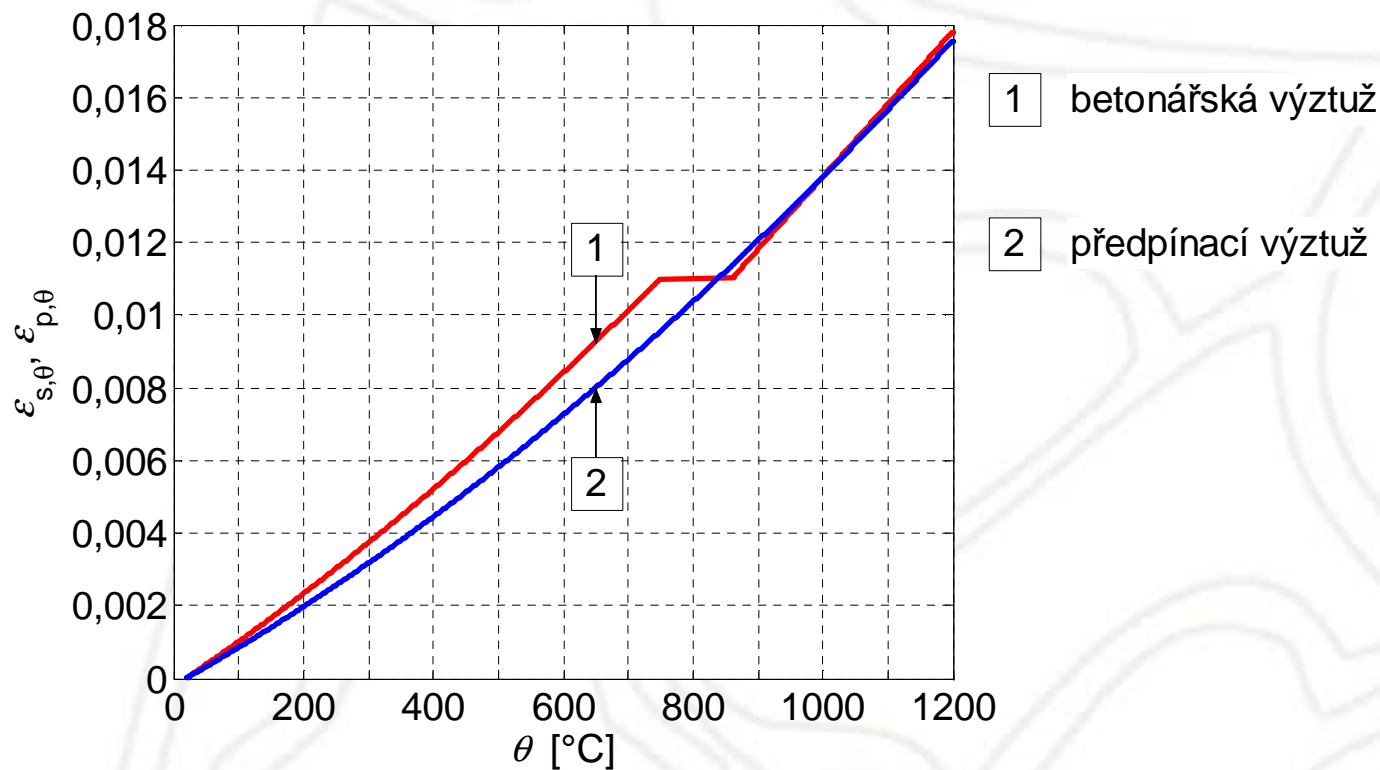
pro $700\text{ °C} < \theta \leq 1200\text{ °C}$

- Vztahy platí pro výztuž třídy N se smluvní mezí kluzu 0,2, lze je použít také pro tahovou výztuž, kde $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$.

Výztuž

Teplotní a fyzikální vlastnosti výztuže

Norma udává pouze vztahy vyjadřující teplotní závislost teplotního poměrného přetvoření výztuže.



Principy návrhu betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru

- Materiálové vlastnosti
- Zatížení při požární situaci
- Ověření požární odolnosti

Návrhové přístupy

Principy návrhu

- Výpočetní model má vystihovat chování konstrukce při požáru.
- V obvyklých případech postačuje řešení konstrukce po částech, příp. po jednotlivých prvcích - nutno zohlednit příslušné okrajové podmínky (způsob podepření, pokles podpor, deformace v důsledku ohřátí).
- Místo výpočtu lze návrh provést na základě zkoušek, příp. s využitím kombinace zkoušek a výpočtů.
- Pro vlastní návrh je nutné definovat:
 - návrhové hodnoty materiálových vlastností,
 - účinky zatížení,
 - podmínky spolehlivosti při požáru.

Principy návrhu

Materiálové vlastnosti

- Návrhové hodnoty mechanických vlastností

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{např.} \quad f_{cd,fi} = k_{c,\theta} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{C,fi}}$$

$X_{d,fi}$... návrhová hodnota materiálové vlastnosti při požární situaci

k_{θ} ... součinitel pro redukci charakteristické hodnoty materiálové vlastnosti v závislosti na teplotě materiálu

X_k ... charakteristická hodnota materiálové vlastnosti pro návrh při běžné teplotě

$\gamma_{M,fi}$... dílčí součinitel spolehlivosti materiálu při požární situaci
(pro beton, ocel i zdivo platí $\gamma_{M,fi} = 1,0$)

Principy návrhu

Materiálové vlastnosti

- Návrhové hodnoty teplotních a fyzikálních vlastností
 - pokud je zvýšení hodnoty vlastnosti pro bezpečnost příznivé

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{např.} \quad c_{pd,fi} = \frac{c_{pk,\theta}}{\gamma_{C,fi}}$$

- pokud je zvýšení hodnoty vlastnosti pro bezpečnost nepříznivé

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} \cdot X_{k,\theta} \quad \text{např.} \quad \lambda_{d,fi} = \gamma_{C,fi} \cdot \lambda_{k,\theta}$$

$X_{k,\theta}$... charakteristická hodnota materiálové vlastnosti při požární situaci (obecně závislá na teplotě)

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Uvažuje se mimořádná návrhová situace dle ČSN EN 1990
- Pro stanovení účinků zatížení $E_{d,fi,t}$ se uvažuje kombinace:

$$E_d = E \left\{ G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}; \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\} \quad j \geq 1; i > 1$$

- $G_{k,j}$... charakteristická hodnota j -tého stálého zatížení
 P ... příslušná reprezentativní hodnota zatížení od předpětí
 A_d ... návrhová hodnota mimořádného (požárního) zatížení
 ψ_1 ... součinitel pro častou hodnotu proměnného zatížení
 ψ_2 ... součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení
 $Q_{k,1}$... charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
 $Q_{k,i}$... charakteristická hodnota i -tého proměnného zatížení

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Dle NA ČSN EN 1991-1-2 se v ČR pro reprezentativní hodnotu proměnného zatížení $Q_{k,1}$ použije kvazistálá hodnota $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$.
- V určitých případech (s ohledem na charakter konstrukce budovy a její umístění), zejména u halových objektů, se má dle NA ČSN EN 1991-1-2 pro zatížení sněhem a větrem při požární situaci použít častá hodnota $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$.

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Doporučené hodnoty součinitelů ψ pro pozemní stavby dle ČSN EN 1990, tab. A.1.1 (výběr)

Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby (viz ČSN EN 1991-1-1)	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Kategorie A: obytné plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: kancelářské plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: shromažďovací plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: obchodní plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: skladovací plochy	1,0	0,9	0,8

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Pro požární situaci představuje A_d návrhovou hodnotu mimořádného zatížení v důsledku teplotního namáhání (rovnoměrné a nerovnoměrné ohřátí konstrukce v podélném a příčném směru).
- Při výpočtu účinků nepřímého zatížení je nutné zohlednit skutečné tuhosti jednotlivých konstrukčních prvků, včetně tuhostí ve stycích a v uložení (při uvažování shodné tuhosti jako při 20 °C vycházejí velmi nepřesné výsledky - výsledné vnitřní síly jsou mnohonásobně větší, než by odpovídalo reálnému namáhání).

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- V některých případech lze účinek mimořádného požárního zatížení zanedbat (např. u staticky určitých konstrukcí nebo tam, kde je zanedbání nepřímého požárního zatížení konzervativní).
- V těchto případech je možné účinky zatížení zjednodušeně stanovit pouze pro čas $t = 0$ podle uvedeného vztahu, kde $A_d = 0$.

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- **Další zjednodušení** (velmi často používané) - účinky zatížení při požární situaci lze odvodit z účinků stanovených při návrhu za běžné teploty:

$$E_{d,fi,t} = E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d$$

E_d ... návrhová hodnota příslušných účinků zatížení za běžné teploty pro základní kombinaci podle ČSN EN 1990

$E_{d,fi}$... odpovídající konstantní návrhová hodnota pro požární situaci

η_{fi} ... redukční součinitel pro úroveň návrhového zatížení při požární situaci

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Stanovení součinitele η_{fi}
 - pokud byla při návrhu za běžné teploty uvažována kombinace zatížení podle vztahu (6.10) ČSN EN 1990

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}$$

ψ_{fi} se uvažuje jako $\psi_{1,1}$ nebo $\psi_{2,1}$ viz výše

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Stanovení součinitele η_{fi}
 - pokud byla při návrhu za běžné teploty uvažována kombinace zatížení podle vztahů (6.10a) a (6.10b) ČSN EN 1990, uvažuje se větší z hodnot:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}}; \quad \eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\xi \cdot \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}$$

ξ ... redukční součinitel pro nepříznivé stálé zatížení G

Principy návrhu

Zatížení při požární situaci

- Stanovení součinitele η_{fi}
 - konzervativně lze uvažovat hodnotu

$$\eta_{fi} = 0,7$$

pro betonové konstrukce

$$\eta_{fi} = 0,65$$

pro zděné konstrukce, s výjimkou užitého zatížení kategorie E (prostory pro skladování a průmyslovou činnost), pro které je doporučena hodnota

$$\eta_{fi} = 0,7$$

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

Podmínky spolehlivosti při posouzení požární odolnosti lze formulovat:

- z hlediska času

$$t_{d,fi} \geq t_{fi,req}$$

$t_{d,fi}$... návrhová doba požární odolnosti

$t_{fi,req}$... požadovaná doba požární odolnosti

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

Podmínky spolehlivosti při posouzení požární odolnosti lze formulovat:

- z hlediska únosnosti

$$R_{d,fi,t} \geq E_{d,fi,t}$$

$R_{d,fi,t}$... návrhová hodnota únosnosti prvku při požární situaci v čase t
 $E_{d,fi,t}$... návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase t

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

Podmínky spolehlivosti při posouzení požární odolnosti lze formulovat:

- z hlediska teploty

$$\theta_d \leq \theta_{d,cr}$$

θ_d ... návrhová hodnota teploty materiálu

$\theta_{d,cr}$... návrhová hodnota kritické teploty materiálu

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

Pro betonové a zděné konstrukce se posouzení nosné funkce (kritérium **R**) provádí ověřením podmínky z hlediska únosnosti, posouzení požárně dělicí funkce (kritéria **EI**) se provádí ověřením podmínky z hlediska teploty.

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

Při vystavení **nominálnímu požáru** musí prvky splňovat kritéria R, E a I takto:

- pouze nosnost **R**
- pouze dělicí funkce (celistvost + izolace) **EI**
- nosnost a dělicí funkce **REI**
- nosnost, dělicí funkce a mechanická odolnost **REI-M**
- dělicí funkce a mechanická odolnost **EI-M**

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

- Kritérium **R** se považuje za splněné, pokud je nosná funkce zachována během požadované doby vystavení účinkům požáru.
- Kritérium **I** se považuje za splněné, pokud průměrný vzrůst teploty na celém odvráceném povrchu je omezen na 140 K a maximální vzrůst teploty na kterémkoli místě tohoto povrchu nepřekročí 180 K.
- Kritérium **E** se považuje za splněné, jestliže je zabráněno průniku plamenů a horkých plynů dělicími prvky.

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

- Pokud má svislý dělicí prvek vyhovět požadavku na odolnost vůči nárazu (kritérium **M**), má prvek odolat vodorovnému soustředěnému zatížení uvedenému v ČSN EN 1363-2.

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

Při vystavení **parametrickému požáru** má být nosná funkce zachována po dobu plně rozvinutého požáru včetně dohořívání nebo po stanovenou dobu. Dělicí funkce je zajištěna tehdy, jestliže jsou splněny následující podmínky:

- průměrný vzrůst teploty na celém odvráceném povrchu do doby dosažení nejvyšší teploty plynu v požárním úseku je omezen na 140 K a maximální vzrůst teploty na kterémkoli místě tohoto povrchu nepřekročí 180 K

Principy návrhu

Ověření požární odolnosti

- během dohořívání má být průměrný vzrůst teploty na celém odvráceném povrchu omezen na $\Delta\theta_1$ a maximální vzrůst teploty na kterémkoli místě tohoto povrchu nepřekročí $\Delta\theta_2$

- pro betonové konstrukce

$$\Delta\theta_1 = 200 \text{ K} \quad \Delta\theta_2 = 240 \text{ K}$$

- pro zděné konstrukce

$$\Delta\theta_1 = 180 \text{ K} \quad \Delta\theta_2 = 220 \text{ K}$$

Návrhové přístupy

Rozdělení dle úrovně přesnosti a komplexnosti

- analýza prvku
- analýza části konstrukce
- globální analýza konstrukce

Návrhové přístupy

Rozdělení dle použitých metod návrhu

- návrh založený na normalizovaných zkouškách požární odolnosti
- návrh s využitím tabulkových údajů
- návrh pomocí zjednodušených výpočetních metod
- návrh pomocí zpřesněných výpočetních metod
- návrh vycházející z požární zkoušky celé konstrukce (*full-scale testing*)

tabulky a zkoušky ... tzv. *osvědčená návrhová řešení*

Návrhové přístupy

Rozdělení dle uvažovaného modelu požáru

- požární scénář předpokládající rovnoměrné rozložení teploty plynů v požárním úseku (nominální teplotní křivky, parametrické teplotní křivky)
- požární scénář předpokládající nerovnoměrné rozložení teploty plynů v požárním úseku (vicezónové modely, výpočetní dynamické modely)

Návrhové přístupy

Faktory ovlivňují volbu návrhového přístupu

- typ konstrukce (typická, atypická)
- účel objektu (provoz)
- požadovaná přesnost vystižení reálné odezvy konstrukce při vystavení požáru
- dostupný výpočetní aparát
- použité materiály (běžné, netradiční)
- požadavek na rychlost dosažení výsledků apod.

Návrhové přístupy - možné kombinace

[7]

		Požární scénář		
		Rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku		Nerovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku
		Nominální teplotní křivky	Parametrické teplotní křivky	
Úroveň návrhu	Analýza prvku	Zkoušky Tabulky <i>Zjednodušené metody</i> Zpřesněné metody	Zkoušky? Tabulky? <i>Zjednodušené metody</i> Zpřesněné metody	Zkoušky <i>Zjednodušené metody</i> Zpřesněné metody
	Analýza části konstrukce	Zkoušky? <i>Zjednodušené metody?</i> Zpřesněné metody	Zkoušky? <i>Zjednodušené metody?</i> Zpřesněné metody	Zkoušky Zpřesněné metody
	Globální analýza konstrukce	Zpřesněné metody	Zpřesněné metody	Zkoušky Zpřesněné metody

„?“ v současnosti tuto metodu nelze použít, avšak není vyloučeno, že v budoucnu to možné bude.

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1992-1-2 pro betonové konstrukce

- Tabulkové hodnoty pro
 - sloupy
 - stěny
 - tažené prvky
 - nosníky
 - desky

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1992-1-2 pro betonové konstrukce

- Zjednodušené výpočetní metody
 - metoda izotermy 500 °C pro prvky namáhané ohybovým momentem a/nebo normálovou silou (B.1)
 - zónová metoda pro prvky namáhané ohybovým momentem a/nebo normálovou silou (B.2)
 - metoda pro štíhlé sloupy ztužených konstrukcí (B.3), na které jsou založeny tabulky uvedené v příloze C
 - metoda pro ověření únosnosti ve smyku a kroucení (D)
 - zjednodušená výpočetní metoda pro nosníky a desky (E)

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1992-1-2 pro betonové konstrukce

- Zpřesněné výpočetní metody
 - norma definuje pouze obecné zásady
- Požární zkoušky
 - nejsou předmětem *návrhových norem* (stanovení požární odolnosti pomocí požárních zkoušek se provádí podle příslušných *zkušebních norem*)
- Normu ČSN EN 1992-1-2 nelze použít pro konstrukce s vnější předpínací výztuží a pro skořepinové konstrukce!

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1996-1-2 pro zděné konstrukce

- Tabulkové hodnoty udávající
 - min tl. nenosných dělicích stěn (**EI**)
 - min tl. dělicích nosných jednovrstvých stěn (**REI**)
 - min tl. neděl. nosných jednovrst. stěn délky $\geq 1,0$ m (**R**)
 - min délky neděl. nosn. jednovrst. stěn délky $< 1,0$ m (**R**)
 - min tl. dělicích nosných a nenosných jednovrstvých i zdvojených požárních stěn (**REI-M** a **EI-M**)
 - min tl. dělicích nosných vrstvených (dutinových) stěn s jednou zatíženou dílčí stěnou (kritéria **REI**).

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1996-1-2 pro zděné konstrukce

- Zjednodušené výpočetní metody
 - uvedena 1 metoda v příloze C
 - nejsou definovány hodnoty redukčních součinitelů
 - pochybnosti ohledně uvedených teplotních profilů

→ metodu nelze prakticky využít

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1996-1-2 pro zděné konstrukce

- Zpřesněné výpočetní metody
 - norma definuje pouze obecné zásady
- Požární zkoušky
 - nejsou předmětem *návrhových norem* (stanovení požární odolnosti pomocí požárních zkoušek se provádí podle příslušných *zkušebních norem*)



Děkuji za pozornost!

Seznam použitých zdrojů

- [1] Procházka, J. a kol. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [2] Beneš, M. Změny struktury betonu vlivem hydratačních a dehydratačních procesů za vysokých teplot. Praha: CIDEAS, 2006.
- [3] ČSN EN 1990. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ČNI, 2004.
- [4] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: ČNI, 2004.
- [5] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006.
- [6] ČSN EN 1996-1-2. Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006.
- [7] Fire Design of Concrete Structures - Material, Structures and Modelling (Bulletin 38). Lausanne: fib, 2007
- [8] Khoury, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. Prog. Struct. Engng Mater. 2 (2000), 429-447.
- [9] Kupilík, V. Stavební konstrukce z požárního hlediska. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2006. 272 s. ISBN 80-247-1329-2.
- [10] Zadražil, T. - Vodák, F. - Klokočnicková, H. Změny struktury a pevnosti betonu vyvolané teplotním namáháním. Stav. obzor, 2005, roč. 14, č. 5, s. 141-143. ISSN 1210-4027.

© Radek Štefan, Jaroslav Procházka, 2012-2013

Poslední úprava: 20. 2. 2013

Připomínky a návrhy na vylepšení prezentace zasílejte prosím na adresu radek.stefan@fsv.cvut.cz

Upozornění:

Materiál slouží pouze pro studijní a výukové účely v rámci předmětů vyučovaných na Fakultě stavební ČVUT v Praze!