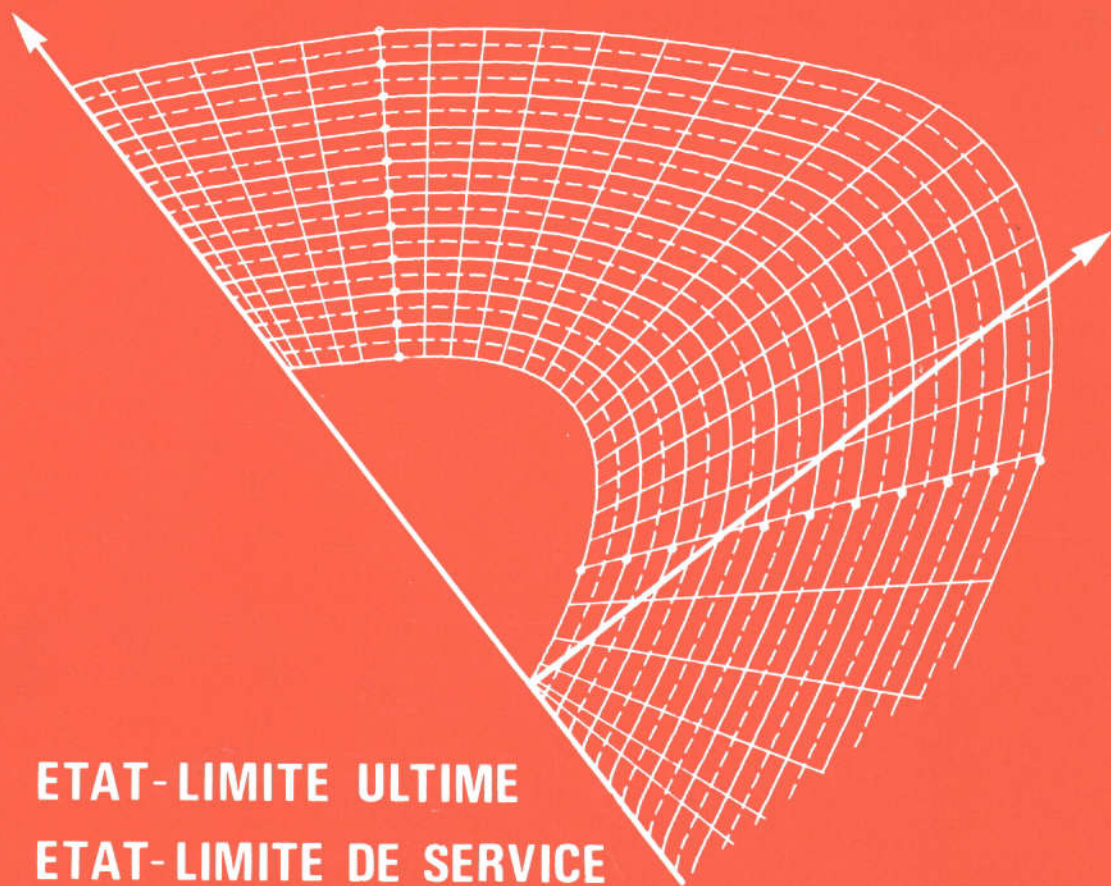


MINISTÈRE DES TRANSPORTS  
DIRECTION DES ROUTES

***Abaques de flexion  
composée***



MINISTERE DES TRANSPORTS  
DIRECTION DES ROUTES

---

244, Bd. Saint - Germain - 75775 PARIS - CEDEX 16

**Abaques de flexion composée**  
Etat - limite ultime  
Etat - limite de service

Décembre 1982

**Ont assuré l'élaboration de ce document :**

**MM. FERREIRA  
MILLAN  
SUCHE**

# SOMMAIRE

<b>MODE D'EMPLOI</b>	<b>5</b>
<b>1 - INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>2 - NOTATIONS ET PRESENTATION</b>	
2.1 - Abaques à l'état-limite ultime	6
2.2 - Abaques à l'état-limite de service	8
<b>3 - EXEMPLES D'UTILISATION</b>	<b>10</b>
3.1 - Abaques à l'état-limite ultime	10
3.2 - Abaques à l'état-limite de service	14
<b>ETAT-LIMITE ULTIME : SECTIONS CIRCULAIRES</b>	<b>21</b>
Acier naturel	22
$R_s/R = 0.80$	22
$R_s/R = 0.85$	24
$R_s/R = 0.90$	26
Acier écroui	28
$R_s/R = 0.80$	28
$R_s/R = 0.85$	30
$R_s/R = 0.90$	32
<b>ETAT-LIMITE ULTIME : SECTIONS RECTANGULAIRES, 2 NAPPE D'ARMATURES</b>	<b>35</b>
Acier naturel	36
$d/h = 0.80$	36
$d/h = 0.85$	38
$d/h = 0.90$	40
$d/h = 0.95$	42
Acier écroui	44
$d/h = 0.80$	44
$d/h = 0.85$	46
$d/h = 0.90$	48
$d/h = 0.95$	50
<b>ETAT-LIMITE ULTIME : SECTIONS RECTANGULAIRES, 1 NAPPE D'ARMATURES</b>	<b>53</b>
Acier naturel	54
$d/h = 0.80$	54
$d/h = 0.85$	56
$d/h = 0.90$	58
$d/h = 0.95$	60
Acier écroui	62
$d/h = 0.80$	62
$d/h = 0.85$	64
$d/h = 0.90$	66
$d/h = 0.95$	68
<b>ETAT-LIMITE DE SERVICE : SECTIONS CIRCULAIRES</b>	<b>71</b>
$R_s/R = 0.80$	72
$R_s/R = 0.85$	74
$R_s/R = 0.90$	76
<b>ETAT-LIMITE DE SERVICE : SECTIONS RECTANGULAIRES, 2 NAPPE D'ARMATURES</b>	<b>79</b>
$d/h = 0.80$	80
$d/h = 0.85$	82
$d/h = 0.90$	84
$d/h = 0.95$	86
<b>ETAT-LIMITE DE SERVICE : SECTIONS RECTANGULAIRES, 1 NAPPE D'ARMATURES</b>	<b>89</b>
$d/h = 0.80$	90
$d/h = 0.85$	92
$d/h = 0.90$	94
$d/h = 0.95$	96
$d/h = 0.80$ ou $0.85$	98
$d/h = 0.90$ ou $0.95$	99

# **MODE D'EMPLOI**

## **1) INTRODUCTION**

Le présent recueil d'abaques est destiné à permettre le dimensionnement ou la vérification rapide des sections rectangulaires et circulaires en béton armé.

Bien que d'application générale dans le domaine précité la principale motivation ayant conduit à sa constitution est de combler la lacune existant à l'heure actuelle au niveau du dossier FOND-72 pour la détermination du ferrailage des fondations d'ouvrages d'art en béton armé, le plus souvent constituées de pieux circulaires ou de barrettes rectangulaires. Il faut noter que depuis la récente entrée en vigueur des règles BAEL 80 cette lacune s'est encore plus fortement fait sentir auprès des bureaux d'études d'ouvrages d'art non encore équipés de moyens de calcul adaptés.

Compte tenu des caractéristiques de ces règles, exigeant une double vérification des sections, l'une consistant à s'assurer de la non-rupture des matériaux sous l'effet de sollicitations de probabilité d'occurrence faible, l'autre consistant à vérifier leur non-dégradation sous des sollicitations plus fréquentes, il a été bien entendu nécessaire de considérer successivement ces deux cas. On rencontrera donc:

- une famille d'abaques dits à l'état-limite ultime, qui se présentent sous la forme de diagrammes d'interaction effort normal-moment fléchissant (se reporter au commentaire de l'article A.4.3.1 des règles BAEL 80); ces abaques ont été établis pour des armatures de nuance Fe E 40 et pour les deux types de diagrammes déformations-contraintes prévus par les articles A.2.2,21 et A.2.2,22 (respectivement diagramme à palier horizontal, et équation implicite du cinquième degré);

- une famille d'abaques dits à l'état-limite de service, qui sont en fait des abaques relatifs aux traditionnelles vérifications dites "aux contraintes admissibles", et qui permettent d'obtenir, en fonction des sollicitations appliquées (effort normal, moment fléchissant), les contraintes dans les différents matériaux (en particulier contraintes extrêmes dans le béton et dans l'acier et contrainte moyenne sur la section comprimée du béton).

Signalons également que des programmes de calcul fournissant les mêmes services mais d'application beaucoup plus générale (sections en té, etc., diversement ferrillées) ont été développés sur calculatrice de poche (HP 97 en l'occurrence) et peuvent être diffusés sur demande auprès du DOA du SETRA (arrondissement G2).

## 2). NOTATIONS ET PRESENTATION

Les notations ont été dans la mesure du possible choisies de façon à être compatibles avec celles des règles BAEL 80. Selon la géométrie des sections des notations particulières ont été utilisées mais leur signification est explicitée sur chaque abaque; elles ne seront donc pas davantage commentées.

Les efforts ( $N$  et  $M$ ) sont définis par rapport au centre de gravité de la section totale de béton qui, dans tous les cas envisagés, est situé à la moitié de la hauteur totale.

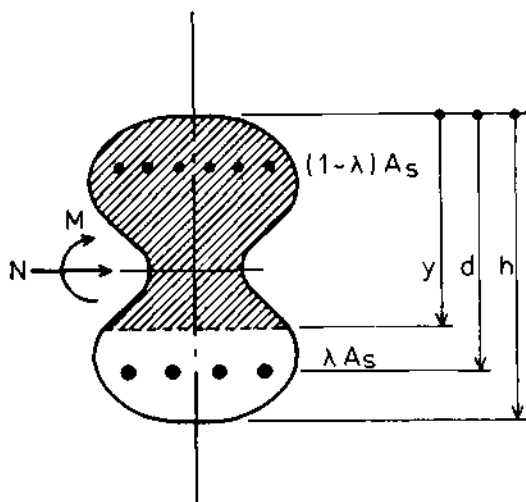


Figure 1

Le rapport exprimé en % de la section totale d'armatures ( $A_s$ ) à la section totale du béton est noté  $\rho$ .

La distance  $d$  désigne la distance de la fibre supérieure du béton à l'armature la plus tendue ou la moins comprimée; l'attention de l'utilisateur est attiré sur le fait que le BAEL accorde une signification différente dans certaines configurations à la notation  $d$  (cf Annexe C du BAEL).

Les autres notations sont spécifiques à l'une ou l'autre des deux familles d'abaques.

Trois valeurs du rapport  $d/h$  ont été retenues pour les sections circulaires et quatre pour les sections rectangulaires ce qui permet de traiter un grand nombre de cas dans la pratique par interpolation.

### 2.1 - Abaques à l'état-limite ultime

Ainsi qu'il a été dit en (1) ces abaques sont des diagrammes d'interaction.

Pour respecter les prescriptions sur les aciers du BAEL 80 deux diagrammes déformations-contraintes ont été envisagés:

- cas des aciers naturels (cf article A.2.2,21 du BAEL);
- cas des aciers écrouis (cf article A.2.2,221 du BAEL).

Toujours dans le même but, deux valeurs de  $\gamma_s$  ont été retenues:

- 1,00 (page de gauche)
- 1,15 (page de droite).

Par ailleurs, ces abaques ont été établis dans l'hypothèse d'une limite d'élasticité des aciers  $f_e = 400$  MPa et ne sont donc utilisables que dans ce cas.

L'utilisateur peut par contre fixer le palier du diagramme déformations-contraintes du béton dit "parabole-rectangle". Cette valeur est égale dans les cas relevant du BAEL 80 à la valeur notée couramment  $f_{bu}$ :

$$f_{bu} = \frac{0,85 f_{cj}}{\gamma_b} \quad \text{où } \gamma_b \text{ peut prendre les valeurs } 1,15 \text{ ou } 1,5$$

selon que les combinaisons sont accidentelles ou non.

Les abaques ont l'allure générale de celui représenté à la figure 2 ci-dessous.

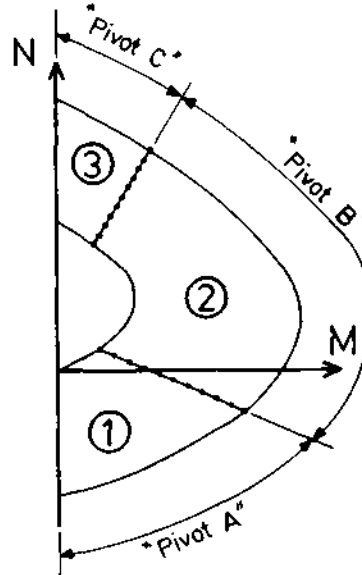


Figure 2

Les droites passant par les points cerclés matérialisent les frontières entre les domaines 1, 2 et 3 décrits à l'article A.4.3.3. du BAEL 80.

Les droites paramétrées par  $\alpha$  sur les abaques correspondent à des positions données de l'axe neutre et facilitent l'interpolation voire l'extrapolation. Il faut noter que  $\alpha$  prend une signification différente selon que la section est circulaire ou rectangulaire:

- pour les sections circulaires l'origine est prise au centre de la section,  $\alpha$  est égal à 1 quand l'axe neutre est sur la fibre supérieure du béton, à -1 quand il est sur la fibre inférieure;
- pour les sections rectangulaires  $\alpha$  est égal à  $y/h$  avec les notations de la figure 1.

## 2.2 - Abaques à l'état-limite de service

Dans tout ce qui suit les efforts  $N$  et  $M$  peuvent être quelconques à condition que le diagramme de déformation qui en résulte soit à pente positive; le coefficient d'équivalence acier-béton est égal à 15.

On désigne dans tout le document par  $\sigma_{bc}$  ou  $\sigma_{bcMax}$  la contrainte de compression sur la fibre supérieure du béton et  $\sigma_s$  la contrainte en valeur algébrique de l'armature la plus tendue ou la moins comprimée (la convention de signe étant que  $\sigma_s$  est positive quand l'armature considérée est en traction, négative dans le cas contraire).

Si l'on trace pour une section du type de celle représentée à la figure 1, dans les axes  $(\sigma_s/M, \sigma_{bc}/M)$  les résultats obtenus pour un pourcentage faible d'armatures  $\rho_0$  et pour un pourcentage élevé d'armatures  $\rho_1$  pour divers couples  $N, M$  on parvient à un diagramme ayant l'allure de celui donné à la figure 3.

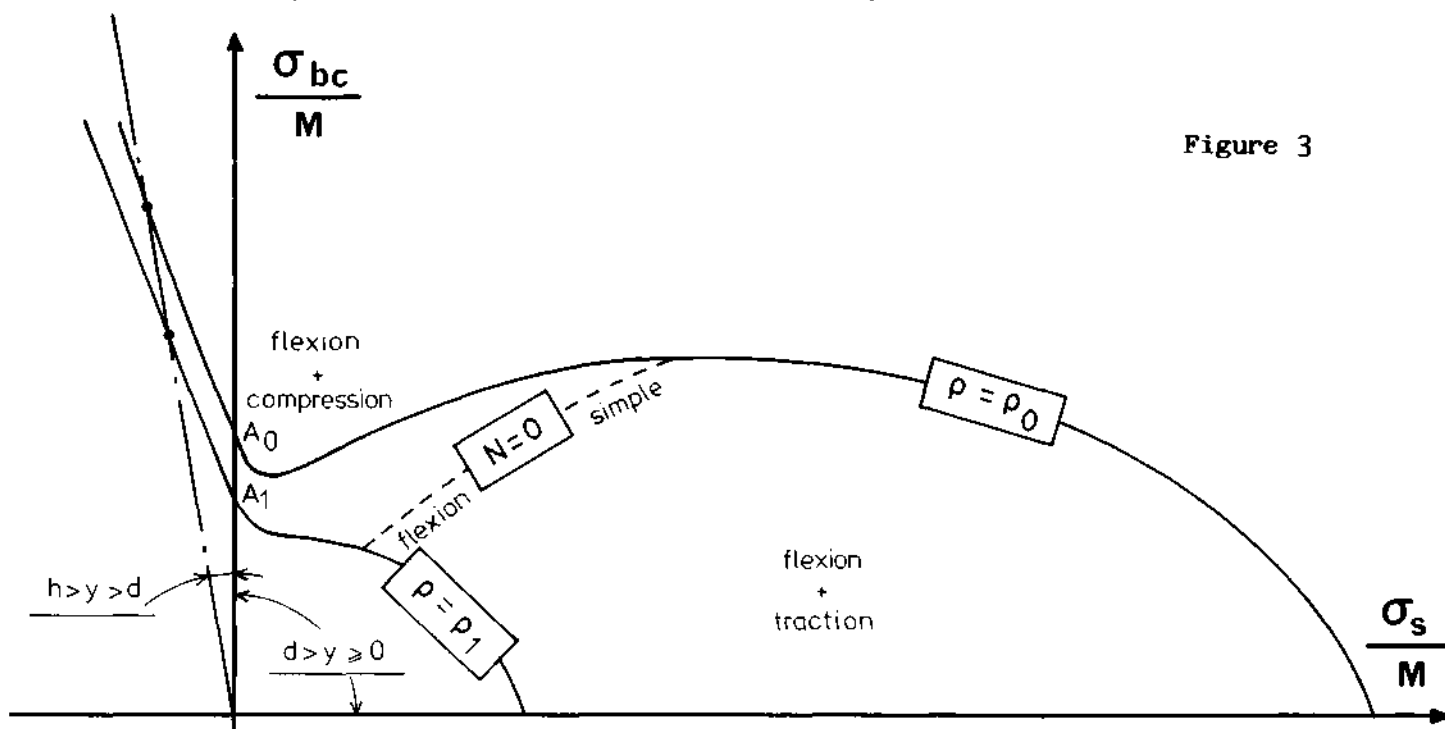


Figure 3

A toutes les droites passant par l'origine correspond une position unique de l'axe neutre; les plus remarquables sont l'axe  $\sigma_{bc} = 0$  où l'axe neutre est confondu avec la fibre supérieure du béton ( $y = 0$ ), l'axe  $\sigma_s = 0$  où l'axe neutre est confondu avec les aciers disposés le plus bas dans la section ( $y = d$ ), enfin la droite matérialisée par des points cerclés où l'axe neutre est confondu avec la fibre inférieure du béton ( $y = h$ ).

Pour toutes les formes de section, les abaques proposés sont des diagrammes du type de celui de la figure 3 plus ou moins partiels et sont groupés par paires:

- le premier couvre le domaine  $0 \leq y \leq d$ ;
- le deuxième est un agrandissement partiel du précédent et décrit en plus le domaine  $d \leq y \leq h$ .



Ceci permet de donner pour toute position de l'axe neutre intérieure à la section les contraintes maximales dans l'acier et dans le béton. Il est à noter que la contrainte moyenne du béton n'offre pas d'intérêt dans cette zone puisqu'elle est égale à la moitié de la contrainte maximale pour les sections rectangulaires, et inférieure à cette valeur pour les sections circulaires.

Pour des positions de l'axe neutre inférieures à la fibre la plus basse du béton des relations analytiques simples permettent de calculer facilement les contraintes dans le béton dans le cas des sections armées symétriquement:

$$\text{- pour la contrainte moyenne } \sigma_{\text{bmoyen}} = \frac{N}{A_b + nA_s}$$

$$\text{- pour la contrainte maximale } \sigma_{\text{bc}} = \frac{N}{A_b + nA_s} + \frac{M.v'}{I_b + nI_s}$$

où  $v'$  désigne la distance du centre de gravité du béton à la fibre supérieure de celui-ci.

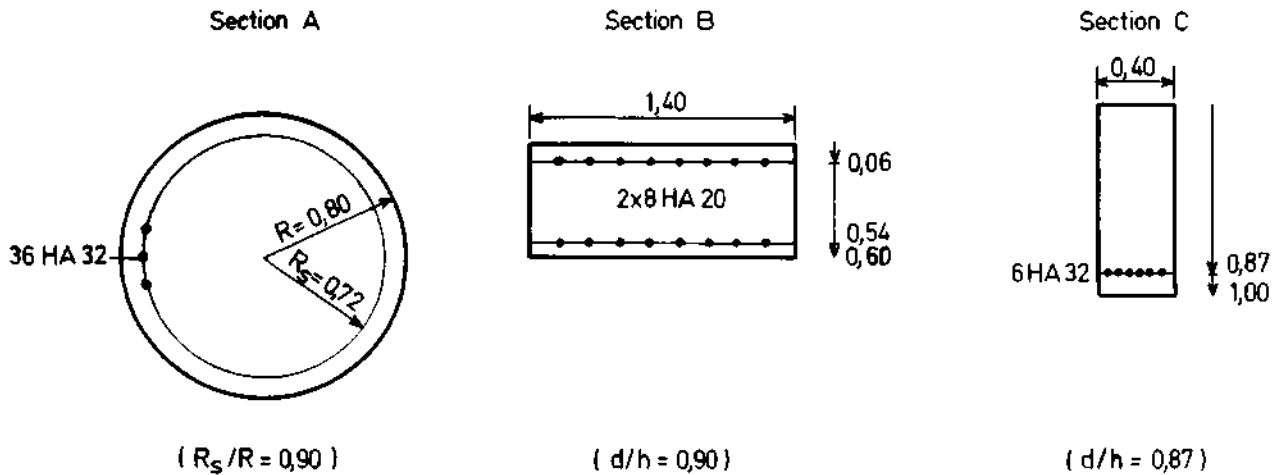
**Remarque :** pour une section circulaire de rayon extérieur  $R$  et de rayon des armatures  $R_s$ :

$$A_b + nA_s = \pi R^2 \left(1 + \frac{n\rho}{100}\right) \quad \text{et} \quad I_b + nI_s = \frac{\pi R^4}{4} \left[1 + \frac{2n\rho}{100} \left(\frac{R_s}{R}\right)^2\right]$$

Les expressions donnant ces contraintes étant un peu plus compliquées pour le cas des sections rectangulaires armées avec une seule nappe d'armatures du fait de la non coïncidence du centre de gravité du béton et de celui des armatures, les abaques ont été complétés par une série de quatre autres reliant la contrainte maximale  $\sigma_{\text{bcmax}}$  à la contrainte moyenne  $\sigma_{\text{bcmoyen}}$  lorsque le béton est entièrement comprimé.

### 3) EXEMPLES D'UTILISATION

Les exemples qui suivent concernent les trois sections suivantes appelées A, B et C.



Toutes les cotes sont données en mètres, excepté les diamètres des armatures qui sont exprimés en mm.

Les pourcentages d'armatures  $\rho$  pour ces trois sections sont donnés dans le tableau ci-dessous:

sections	A	B	C
$\rho$ (en pourcentage)	1,44	0,60	1,21
nature de l'acier	ECROUI	NATUREL	ECROUI

On prend pour valeur unique de la résistance caractéristique du béton à 28 jours  $f_{c28} = 25$  MPa.

#### 3.1 - Abaques à l'état-limite ultime

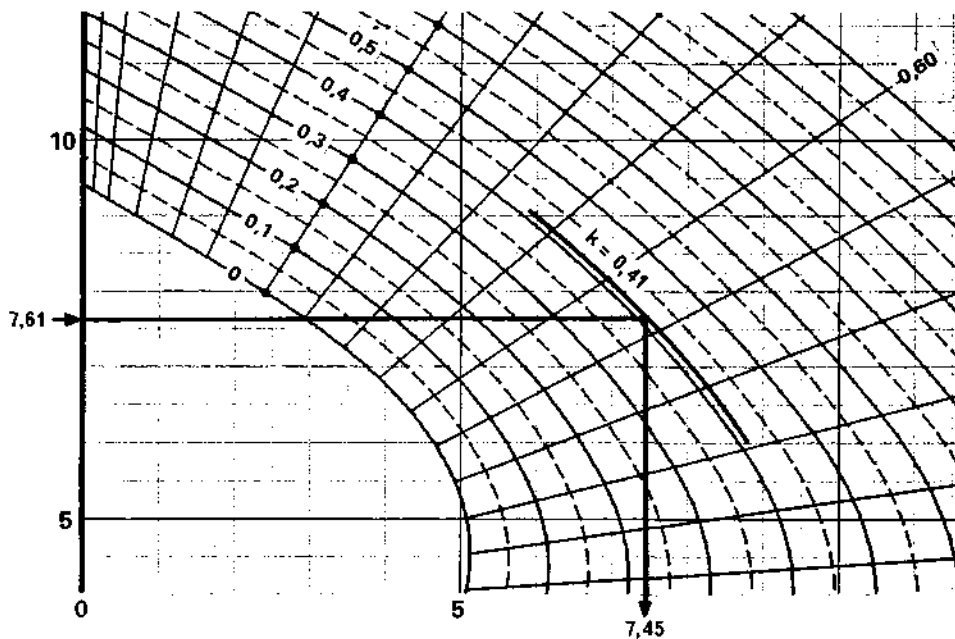
##### 3.1.1 - Section circulaire (A).

On cherche à savoir quel est le moment limite ultime en présence d'un effort normal de compression  $N = 23$  MN en situation non accidentelle.

On commence par calculer les paramètres principaux.

$$f_{bu} = \frac{0,85 \times 25}{1,5} = 14,17 \text{ MPa} \quad ; \quad k = \frac{\rho}{100} \frac{f_e}{f_{bu}} = \frac{1,44}{100} \times \frac{400}{14,17} = 0,41$$

On obtient également: 
$$\frac{3N}{f_{bu}R^2} = \frac{3 \times 23}{14,17 \times (0,8)^2} = 7,61$$



Par lecture sur l'abaque représenté partiellement à la figure ci-dessus, on obtient:

$$\frac{8 \bar{M}}{f_{bu}R^3} = 7,45 \quad \text{d'où} \quad \bar{M} = \frac{7,45 \times 14,17 \times 10^3 \times (0,8)^3}{8} = 6756 \text{ kN.m}$$

### 3.1.2 - Section rectangulaire armée par deux nappes symétriques (B)

Soit à vérifier la section B sous l'effet d'une combinaison accidentelle induisant les sollicitations suivantes:

$$N = 7915 \text{ kN}$$

$$M = 1500 \text{ kN.m}$$

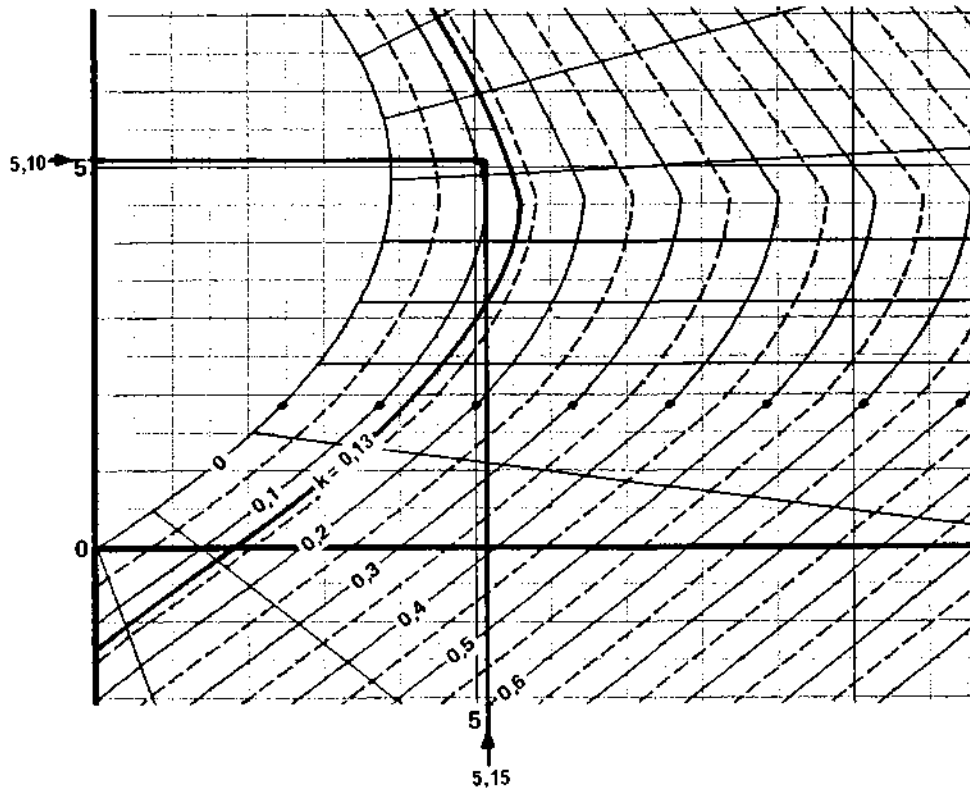
Il faut commencer par évaluer les paramètres principaux:

$$f_{bu} = \frac{0,85 \times 25}{1,15} = 18,48 \text{ MPa} ; \quad k = \frac{\rho}{100} \frac{f_e}{f_{bu}} = \frac{0,60}{100} \times \frac{400}{18,48} = 0,13$$

On obtient également: 
$$\frac{10 N}{f_{bu}bh} = \frac{10 \times 7915 \times 10^{-3}}{18,48 \times 1,40 \times 0,60} = 5,10$$

$$\frac{32 M}{f_{bu}bh^2} = \frac{32 \times 1500 \times 10^{-3}}{18,48 \times 1,40 \times (0,60)^2} = 5,15$$

On reporte ces valeurs sur l'abaque correspondant, représenté partiellement à la figure ci-dessous; il correspond à  $\gamma_S = 1$  et à un acier supposé naturel (cf début § 3).



On constate que le point figurant la sollicitation est bien intérieur au domaine admissible (courbe  $k = 0,13$ ), et que, par ailleurs, la section "travaille" dans le domaine 2.

### 3.1.3 - Section rectangulaire armée par une seule nappe (C).

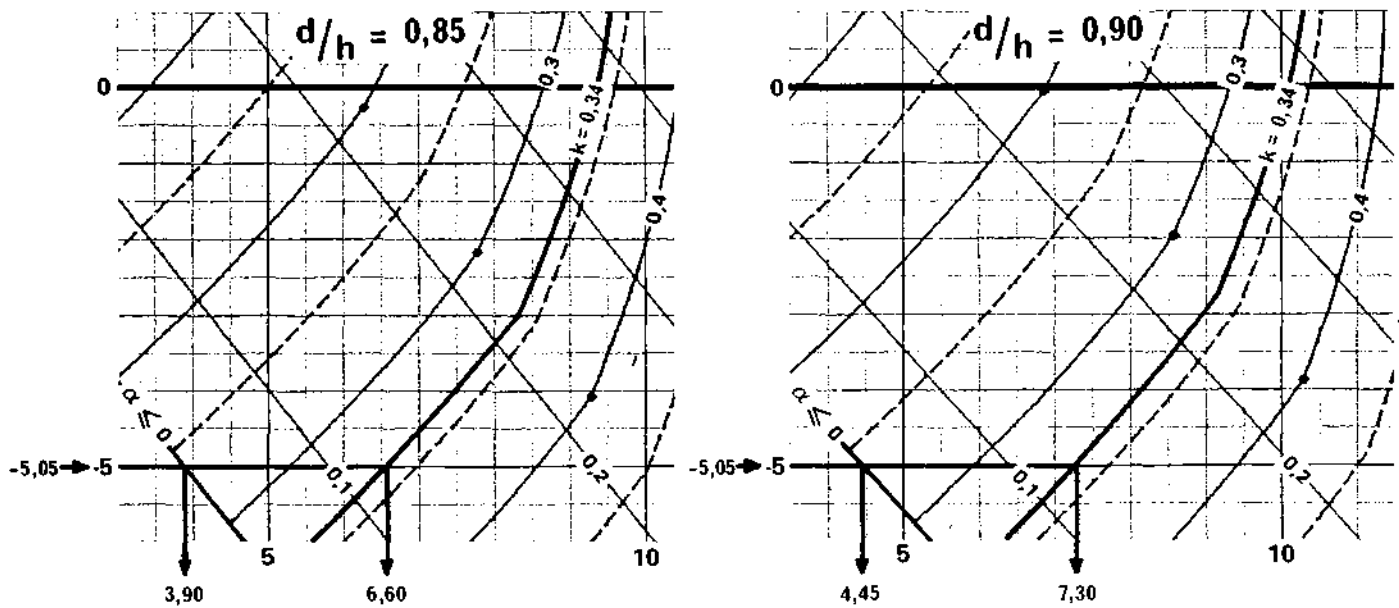
On se propose de chercher quel est le domaine de moments fléchissants compatible avec un effort normal de traction  $N = -1430$  kN en situation non accidentelle.

Il faut tout d'abord évaluer les paramètres principaux nécessaires.

$$f_{bu} = \frac{0,85 \times 25}{1,5} = 14,17 \text{ MPa}; \quad k = \frac{\rho}{100} \frac{f_e}{f_{bu}} = \frac{1,21}{100} \times \frac{400}{14,17} = 0,34$$

$$\frac{20 N}{f_{bu} b h} = \frac{20 \times (-1430 \times 10^{-3})}{14,17 \times 0,40 \times 1,00} = - 5,05$$

Comme la valeur de  $d/h$  est ici 0,87 il va falloir interpoler entre les résultats lus sur l'abaque correspondant à  $d/h = 0,85$  et celui correspondant à  $d/h = 0,90$ . Ce sont des extraits de ces deux abaques qui sont reproduits ci-dessous (rappelons que l'acier de la section C est supposé être écroui et que ici  $\gamma_S = 1,15$ ).



On constate à la lecture des abaques que pour être à l'intérieur du domaine admissible il faut que le moment fléchissant soit compris entre une limite inférieure que l'on notera  $\bar{M}_1$  et une limite supérieure que l'on notera  $\bar{M}_2$ . On obtient ces limites comme indiqué ci-dessus en procédant à l'interpolation linéaire suivante:

$$\frac{45 \bar{M}_1}{f_{bu} b h^2} = 3,90 + \frac{4,45 - 3,90}{0,05} \times 0,02 = 4,12$$

$$\frac{45 \bar{M}_2}{f_{bu} b h^2} = 6,60 + \frac{7,30 - 6,60}{0,05} \times 0,02 = 6,88$$

On obtient donc:

$$\bar{M}_1 = 4,12 \times \frac{14,17 \times 10^3 \times 0,4 \times (1,00)^2}{45} = 519 \text{ kN.m}$$

$$\bar{M}_2 = 6,88 \times \frac{14,17 \times 10^3 \times 0,4 \times (1,00)^2}{45} = 867 \text{ kN.m}$$

En définitive le moment s'exerçant sur la section simultanément à  $N = -1430 \text{ kN}$  doit satisfaire la condition:

$$519 \text{ kN.m} < M < 867 \text{ kN.m.}$$

### 3.2 - Abaques à l'état-limite de service

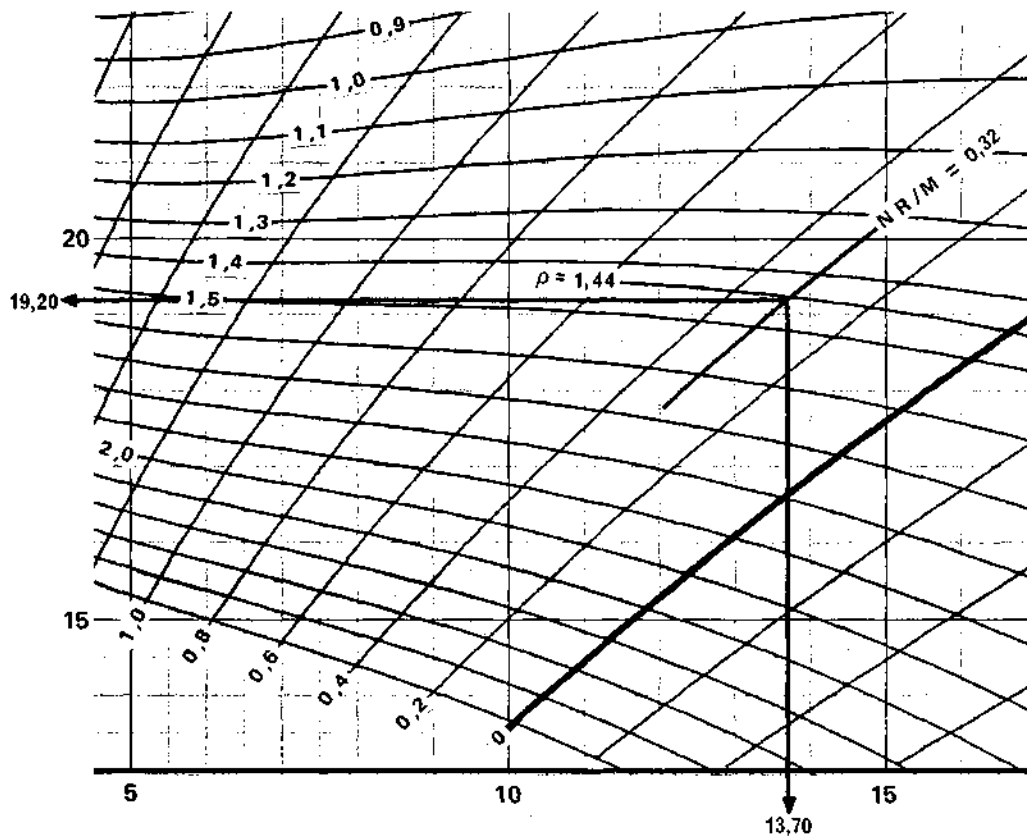
#### 3.2.1 - Section circulaire (A).

Soit à calculer les contraintes maximales dans l'acier et dans le béton induites par les sollicitations:

$$N = 1000 \text{ kN}$$
$$M = 2500 \text{ kN.m}$$

La lecture est possible sur les deux abaques correspondant à  $R_s/R_R = 0,90$ ; on choisit évidemment celui qui permet la lecture la plus aisée (figure ci-dessous).

On a:  $\frac{NR}{M} = \frac{1000 \times 0,8}{2500} = 0,32$



On lit:

$$\frac{0,4 \sigma_s R^3}{M} = 13,70, \quad \text{d'où: } \sigma_s = 13,70 \times \frac{2500 \times 10^{-3}}{0,4 \times (0,8)^3} = 167,2 \text{ MPa}$$

$$\frac{13 \sigma_{bc} R^3}{M} = 19,20, \quad \text{d'où: } \sigma_{bc} = 19,20 \times \frac{2500 \times 10^{-3}}{13 \times (0,8)^3} = 7,2 \text{ MPa}$$

Soit à calculer ces mêmes contraintes sous les sollicitations suivantes:

$$N = 8000 \text{ kN}$$

$$M = 1000 \text{ kN.m}$$

$$\text{On en déduit } \frac{8000 \times 0,8}{1000} = 6,4$$

On constate qu'il n'y a pas de point figuratif sur la courbe  $\rho = 1,44$  de l'abaque précédent ce qui signifie qu'il se situe dans la zone située à gauche de la droite reliant les points cerclés, qui correspond au cas où la section est entièrement comprimée.

Seule la contrainte maximale dans le béton offre un intérêt et est obtenue par les formules de la p.11.

La section homogène vaut:

$$A_b + n A_s = \pi \times (0,8)^2 \left[ 1 + 15 \times \frac{1,44}{100} \right] = 2,44 \text{ m}^2$$

Et l'inertie:

$$I_b + n I_s = \pi \times \frac{(0,8)^4}{4} \left[ 1 + 2 \times 15 \times \frac{1,44}{100} (0,9)^2 \right] = 0,43 \text{ m}^4$$

D'où:

$$\sigma_{bc} = \frac{8000 \times 10^{-3}}{2,44} + \frac{1000 \times 10^{-3} \times 0,8}{0,43} = 5,12 \text{ MPa}$$

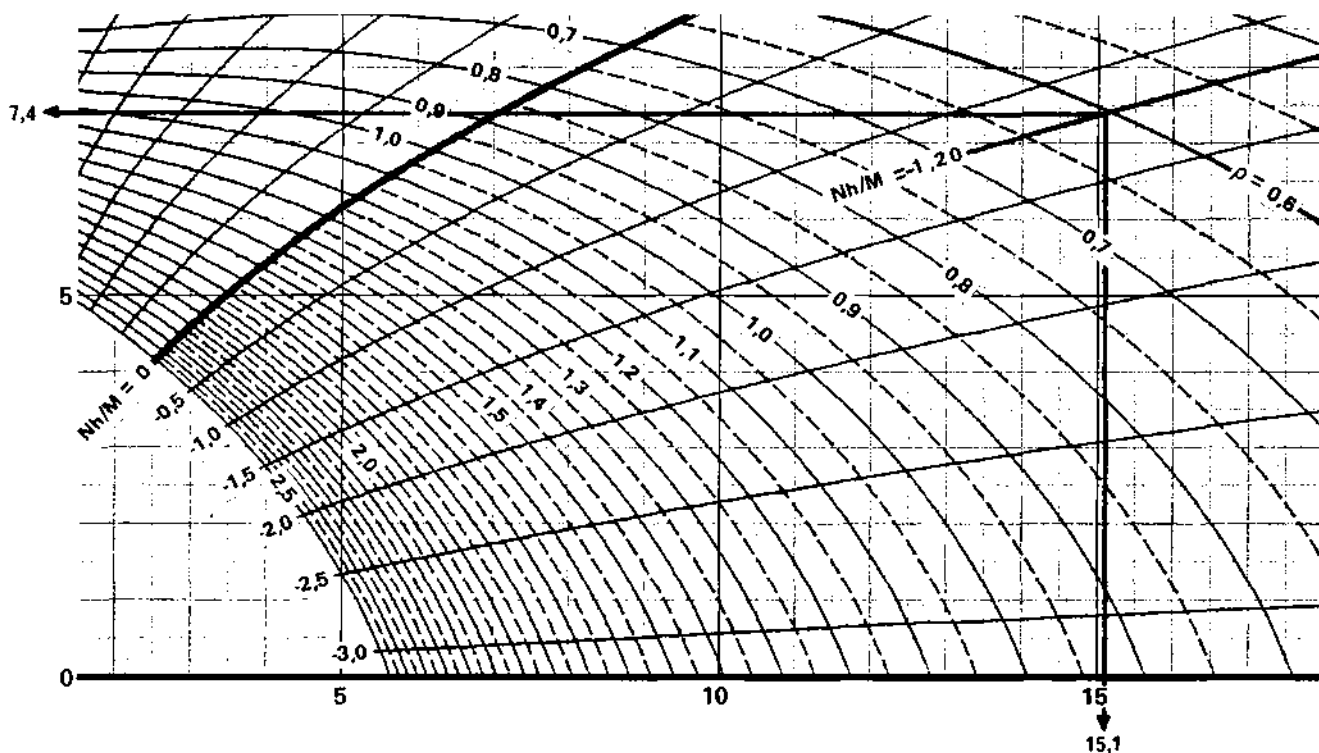
On peut remarquer que la contrainte moyenne dans le béton qui constitue le premier terme de la somme ci-dessus est égale à 3,28 MPa.

### 3.2.2 - Section rectangulaire armée de deux nappes symétriques (B)

Tout se passe exactement comme pour les sections circulaires; les exemples choisis ci-après seront pris dans le domaine de la traction.

Soit  $N = -400 \text{ kN}$  et  $M = 200 \text{ kN.m}$  les efforts sollicitant la section B.

$$\text{On évalue tout d'abord : } \frac{Nh}{M} = - \frac{400 \times 0,60}{200} = -1,20$$



On lit sur l'abaque correspondant (cf figure ci-dessus) :

$$\frac{\sigma_{bc}}{M} bh^2 = 7,4, \quad \text{d'où: } \sigma_{bc} = 7,4 \times \frac{200 \times 10^{-3}}{1,40 \times (0,60)^2} = 2,94 \text{ MPa.}$$

$$\frac{\sigma_s}{40 M} bh^2 = 15,1, \quad \text{d'où: } \sigma_s = 15,1 \times \frac{40 \times 200 \times 10^{-3}}{1,40 \times (0,60)^2} = 239,7 \text{ MPa.}$$

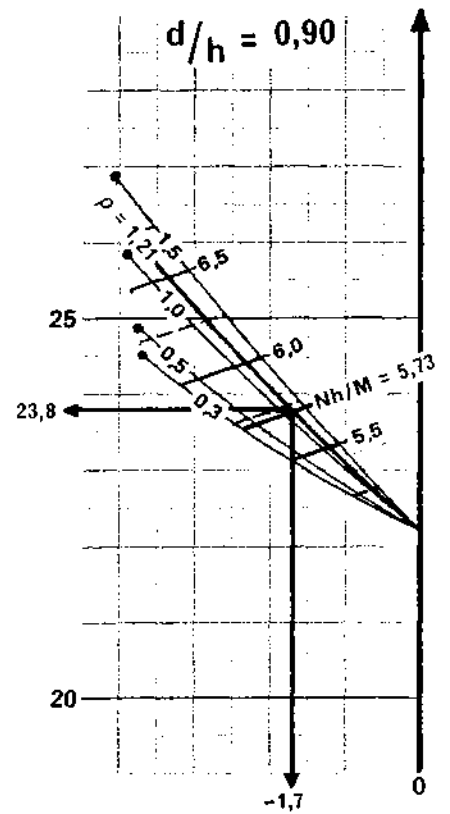
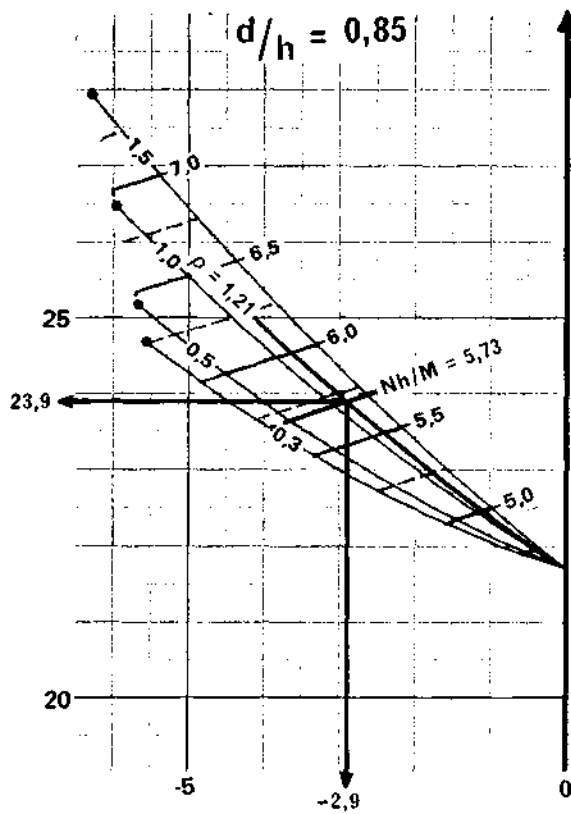
### 3.2.3 - Section rectangulaire armée par une seule nappe

Soit  $N = 2520 \text{ kN}$  et  $M = 440 \text{ kN.m}$  les efforts sollicitant la section C.

$$\text{On évalue } \frac{Nh}{M} = \frac{2520 \times 1,0}{440} = 5,73$$

Comme la valeur de  $d/h$  est ici de 0,87 il est nécessaire d'interpoler entre les deux abaques correspondant aux valeurs 0,85 et 0,90.





On lit les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned}
 & * \text{ pour } d/h = 0,85 \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{2 \sigma_{bc} bh^2}{M} &= 23,90 \\ - \frac{\sigma_{sc} bh^2}{5M} &= -2,90 \end{aligned} \right. \\
 & * \text{ pour } d/h = 0,90 \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{2 \sigma_{bc} bh^2}{M} &= 23,80 \\ - \frac{\sigma_{sc} bh^2}{5M} &= -1,70 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Une interpolation linéaire donne:

$$\frac{2 \sigma_{bc} bh^2}{M} = 23,85$$

$$\frac{\sigma_{sc} bh^2}{5M} = 2,90 + \frac{1,70 - 2,90}{0,05} \times 0,02 = 2,42$$

D'où il vient:

$$\sigma_{bc} = 23,85 \times \frac{440 \times 10^{-3}}{2 \times 0,4 \times (1,0)^2} = 13,1 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{sc} = 2,4 \times \frac{440 \times 10^{-3} \times 5}{0,4 \times (1,0)^2} = 13,3 \text{ MPa.}$$

La connaissance de  $\sigma_{sc}$  n'offre pas d'autre intérêt que celui de localiser la cote de l'axe neutre; celle-ci notée  $y$  s'obtient par la "règle de trois" suivante:

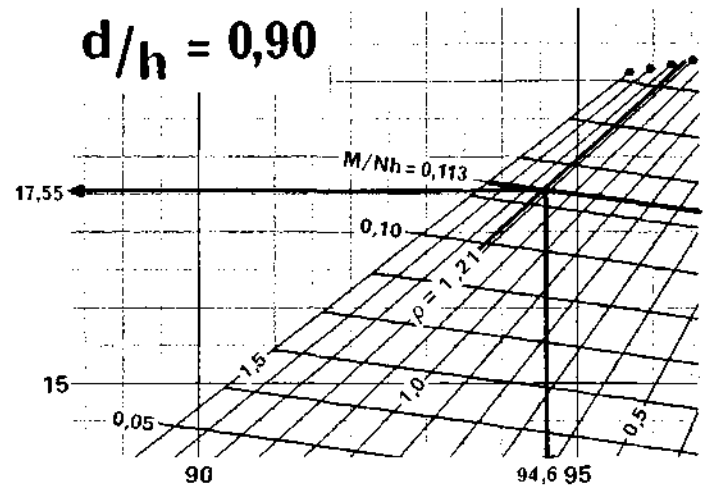
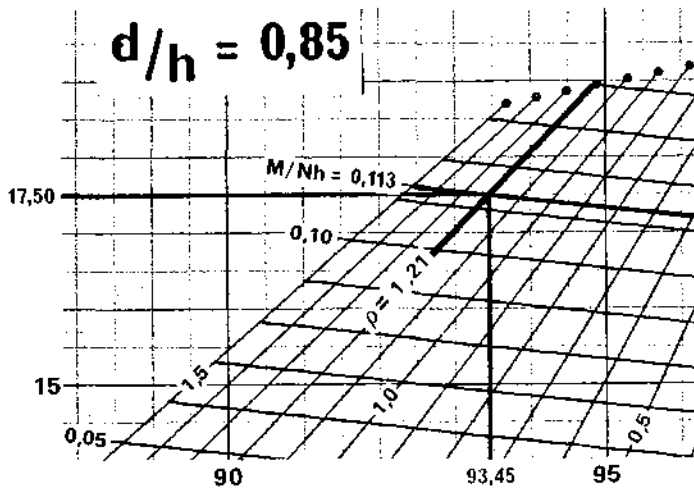
$$\frac{y}{\sigma_{bc}} = \frac{d}{\sigma_{bc} - \frac{\sigma_{sc}}{n}}$$

d'où il vient immédiatement:  $y = 13,1 \times \frac{0,87}{13,1 - \frac{13,3}{15}} = 0,93 \text{ m.}$

L'axe neutre est donc situé à environ 7 cm de la fibre inférieure du béton.

. Supposons que les efforts soient à présent  $N = 3200 \text{ kN}$  et  $M = 360 \text{ kN.m.}$

On évalue  $Nh/M = 8,89$ . Il n'y a pas de point figuratif correspondant à ces valeurs sur les abaques reproduits ci-dessus, et on sait que cela signifie que l'axe neutre n'est plus compris dans la section (en l'occurrence il est situé au-dessous de la fibre inférieure de la section).



C'est pour éviter un calcul fastidieux que les deux dernières planches d'abaques du volume ont été constituées. La figure ci-contre présente un extrait des deux abaques correspondant aux valeurs de  $d/h$  les plus proches de 0,87 (0,85 et 0,90).

Les paramètres principaux sont:

$$\rho = 1,21 \text{ (comme précédemment) et } M/Nh = \frac{360}{3200 \times 1,0} = 0,113$$

On lit directement sur les abaques:

$$\begin{aligned} * \text{ pour } d/h = 0,85 & \left\{ \begin{aligned} \frac{10 \sigma_{bcMax} bh}{N} &= 17,50 \\ \frac{100 \sigma_{bcMoy} bh}{N} &= 93,45 \end{aligned} \right. \\ * \text{ pour } d/h = 0,90 & \left\{ \begin{aligned} \frac{10 \sigma_{bcMax} bh}{N} &= 17,55 \\ \frac{100 \sigma_{bcMoy} bh}{N} &= 94,60 \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Après interpolation linéaire on trouve:

$$\frac{10 \sigma_{bcMax} bh}{N} = 17,50$$

$$\frac{100 \sigma_{bcMoy} bh}{N} = 93,45 + \frac{94,60 - 93,45}{0,05} \times 0,02 = 93,90$$

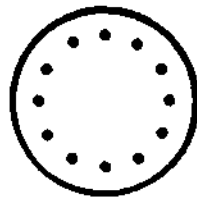
D'où il vient:

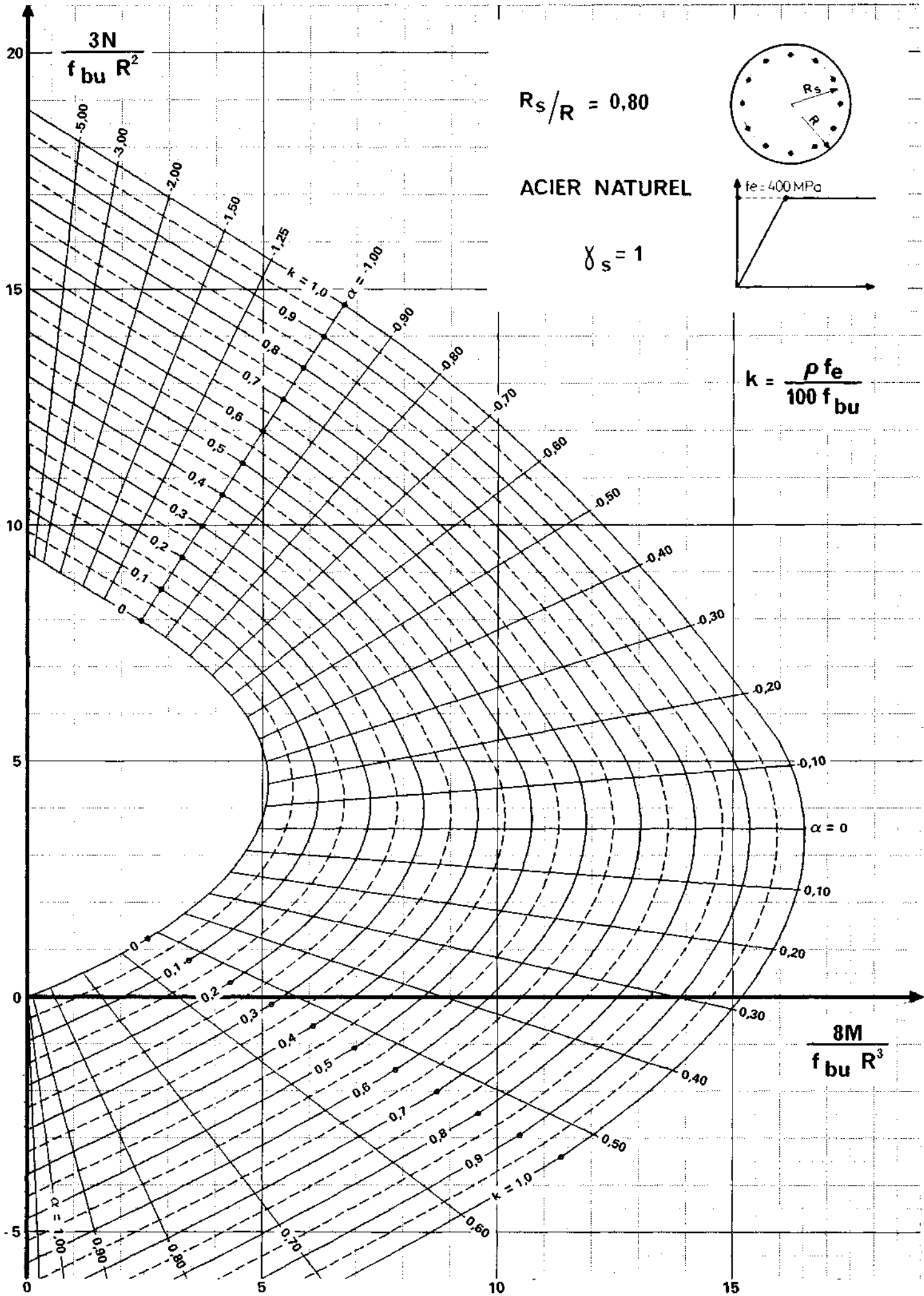
$$\sigma_{bcMax} = 17,5 \times \frac{3200 \times 10^{-3}}{10 \times 0,4 \times 1} = 14,0 \text{ MPa.}$$

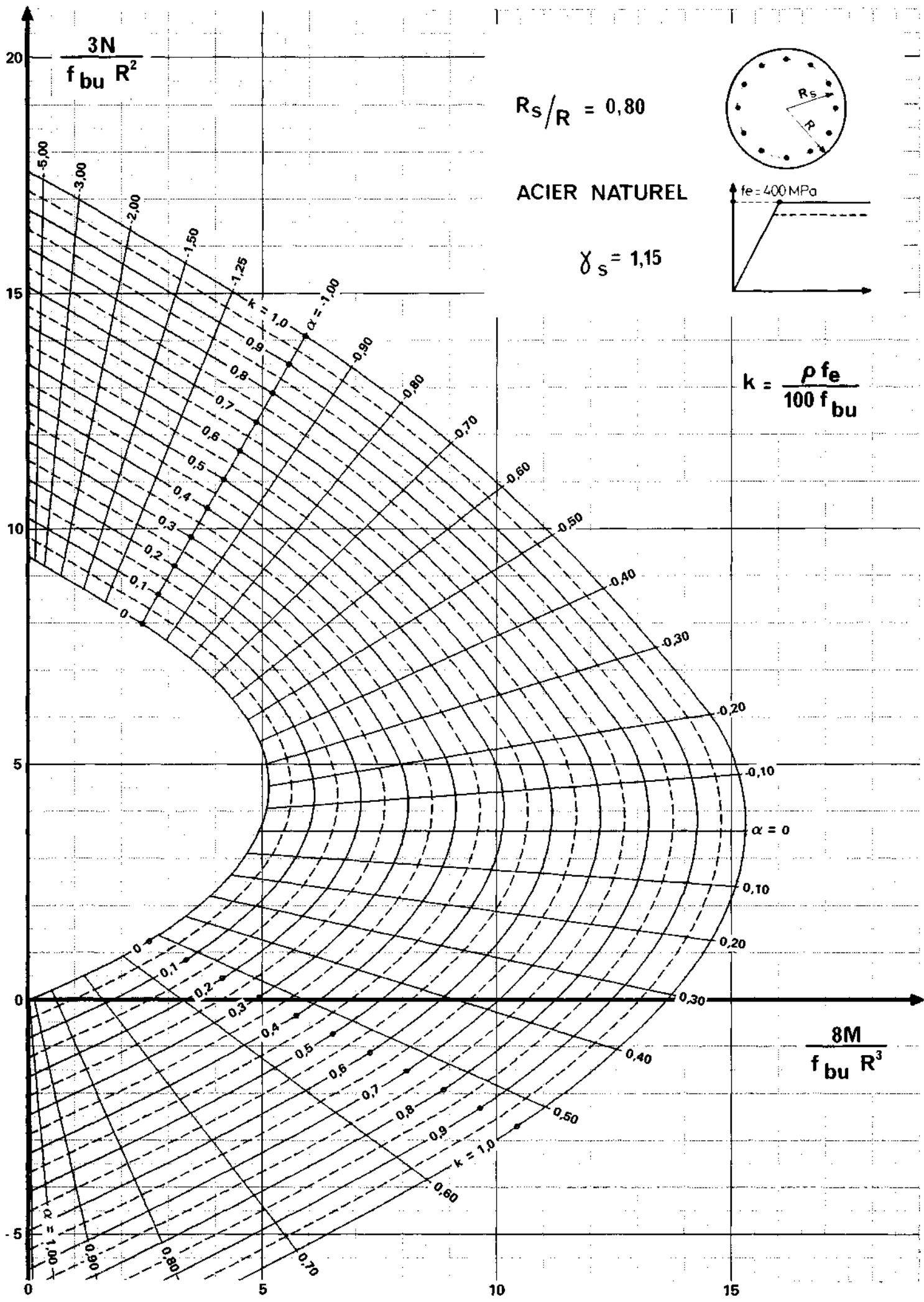
$$\sigma_{bcMoy} = 93,9 \times \frac{3200 \times 10^{-3}}{100 \times 0,4 \times 1} = 7,5 \text{ MPa.}$$

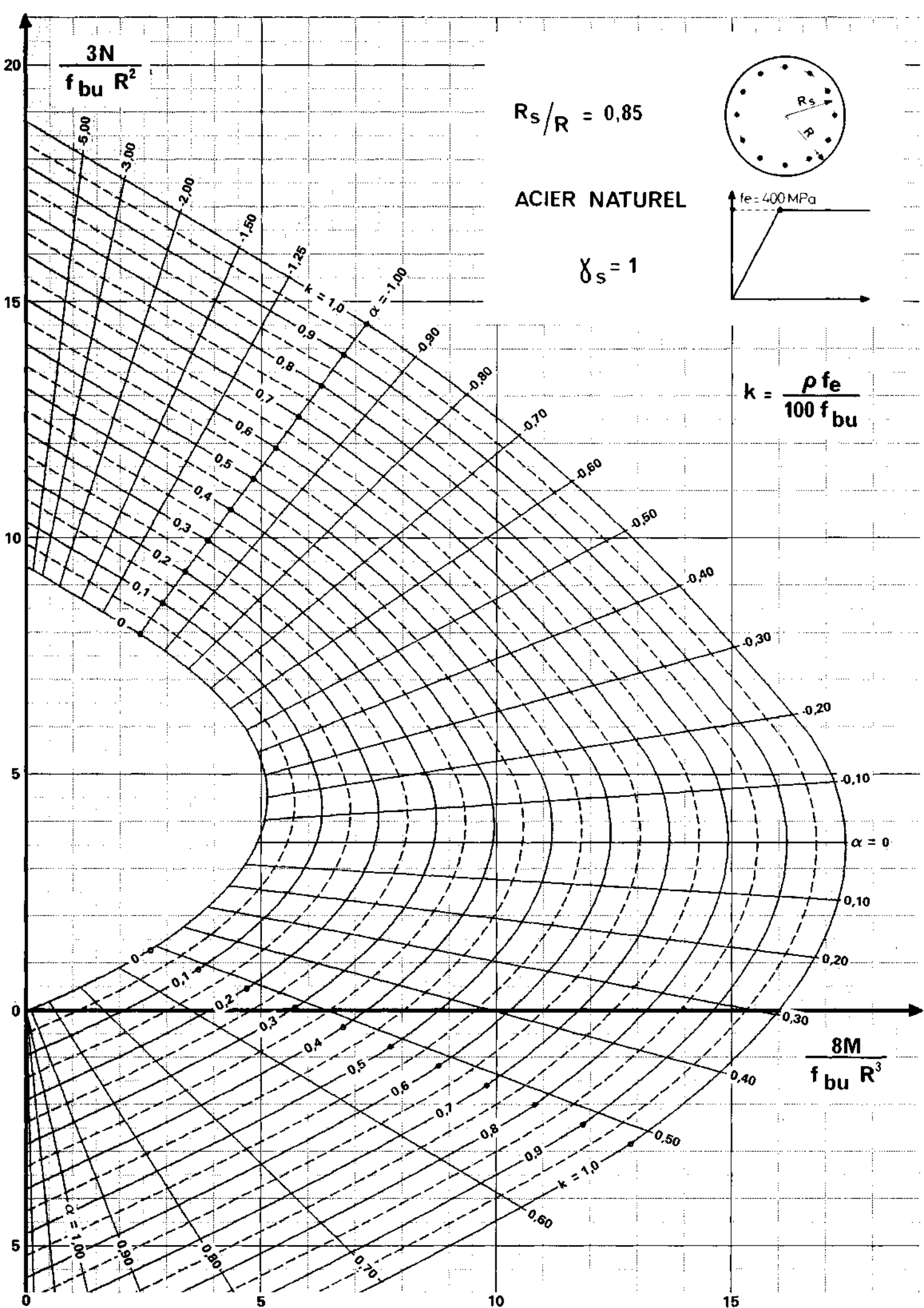
# ***ETAT-LIMITE ULTIME***

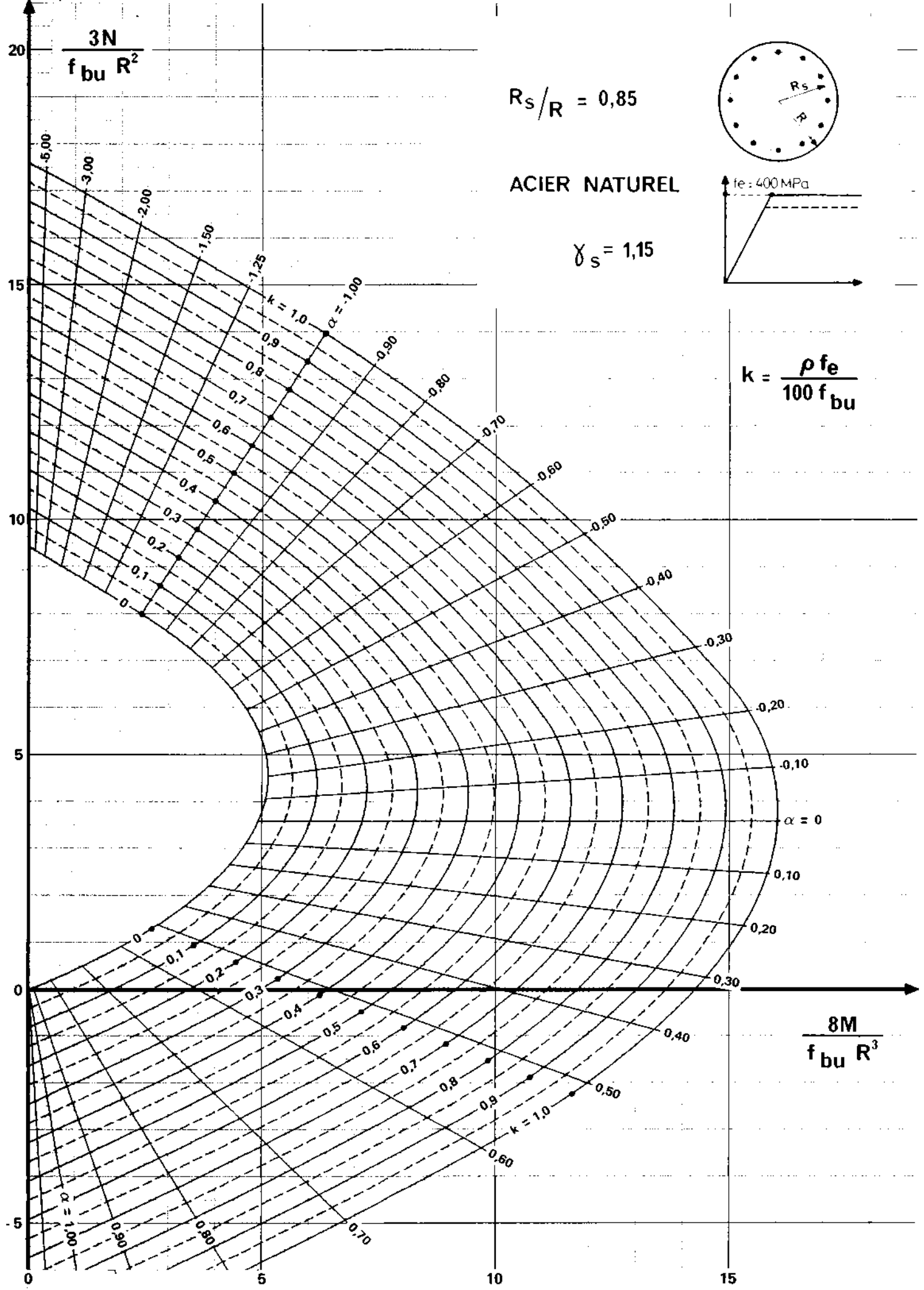
Section circulaire



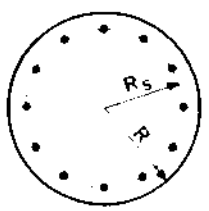






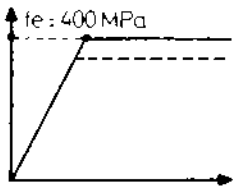


$R_s/R = 0,85$



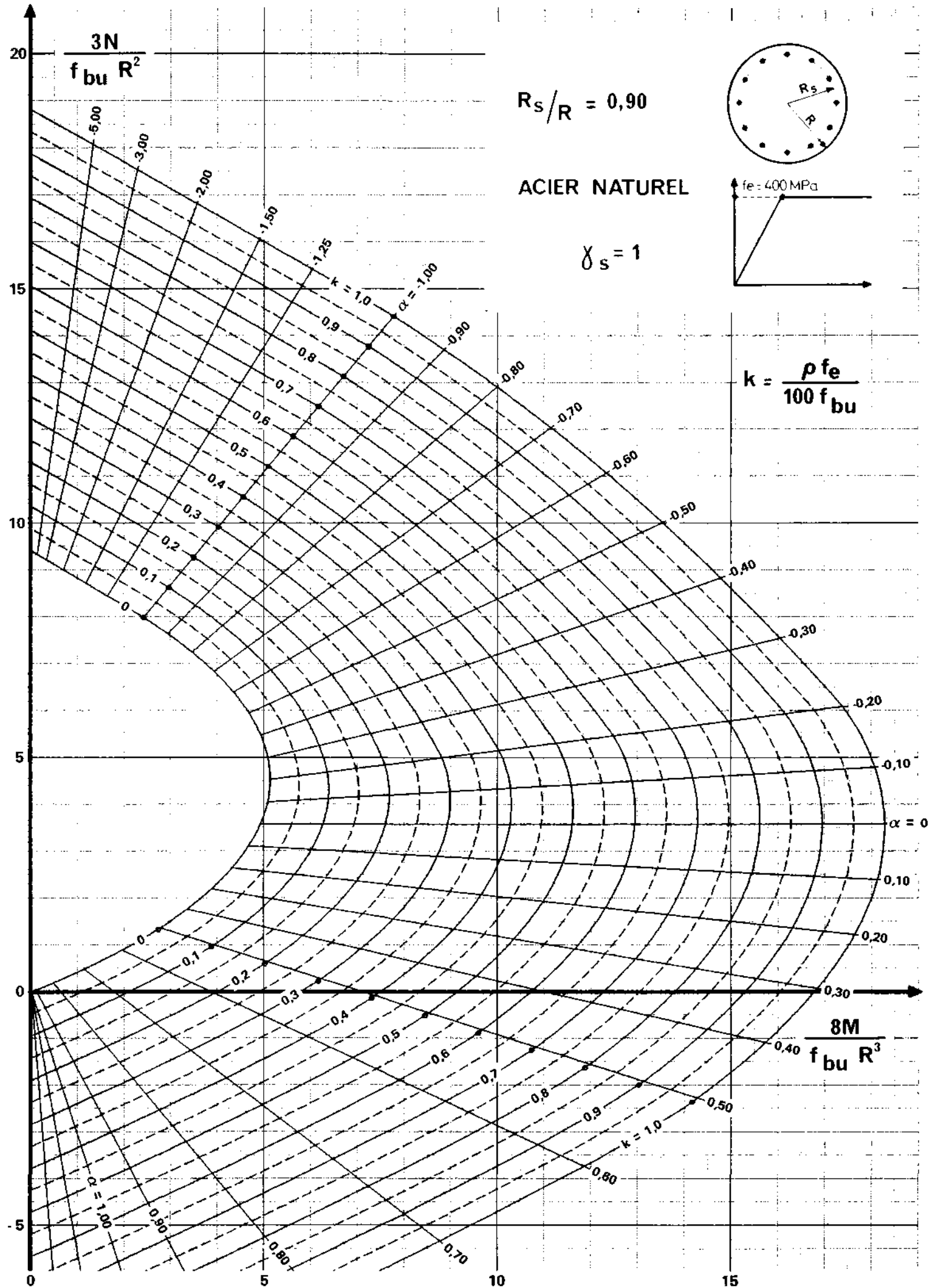
ACIER NATUREL

$\gamma_s = 1,15$

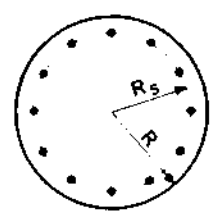


$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$



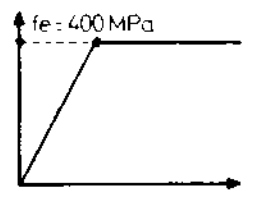


$$R_s / R = 0,90$$

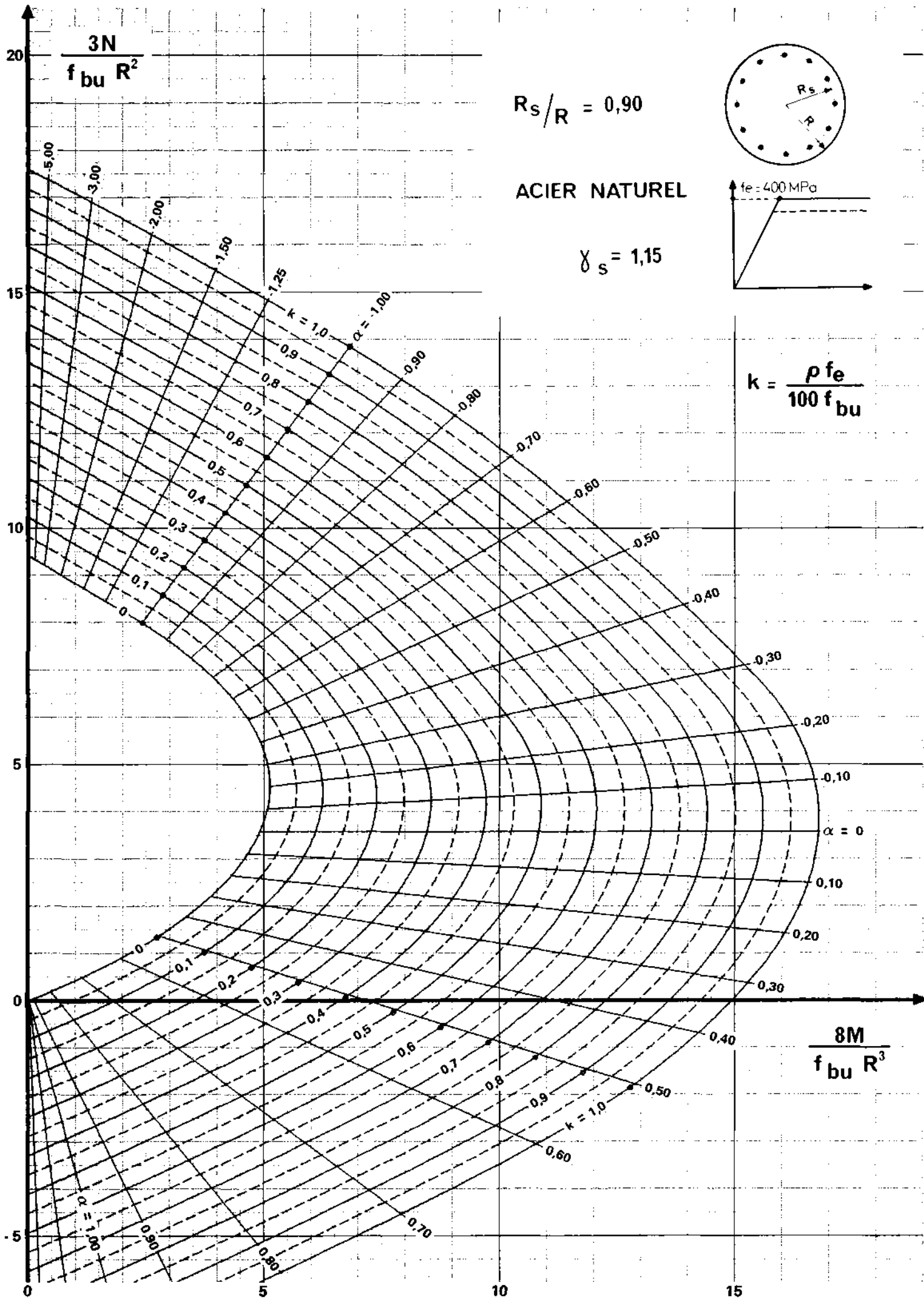


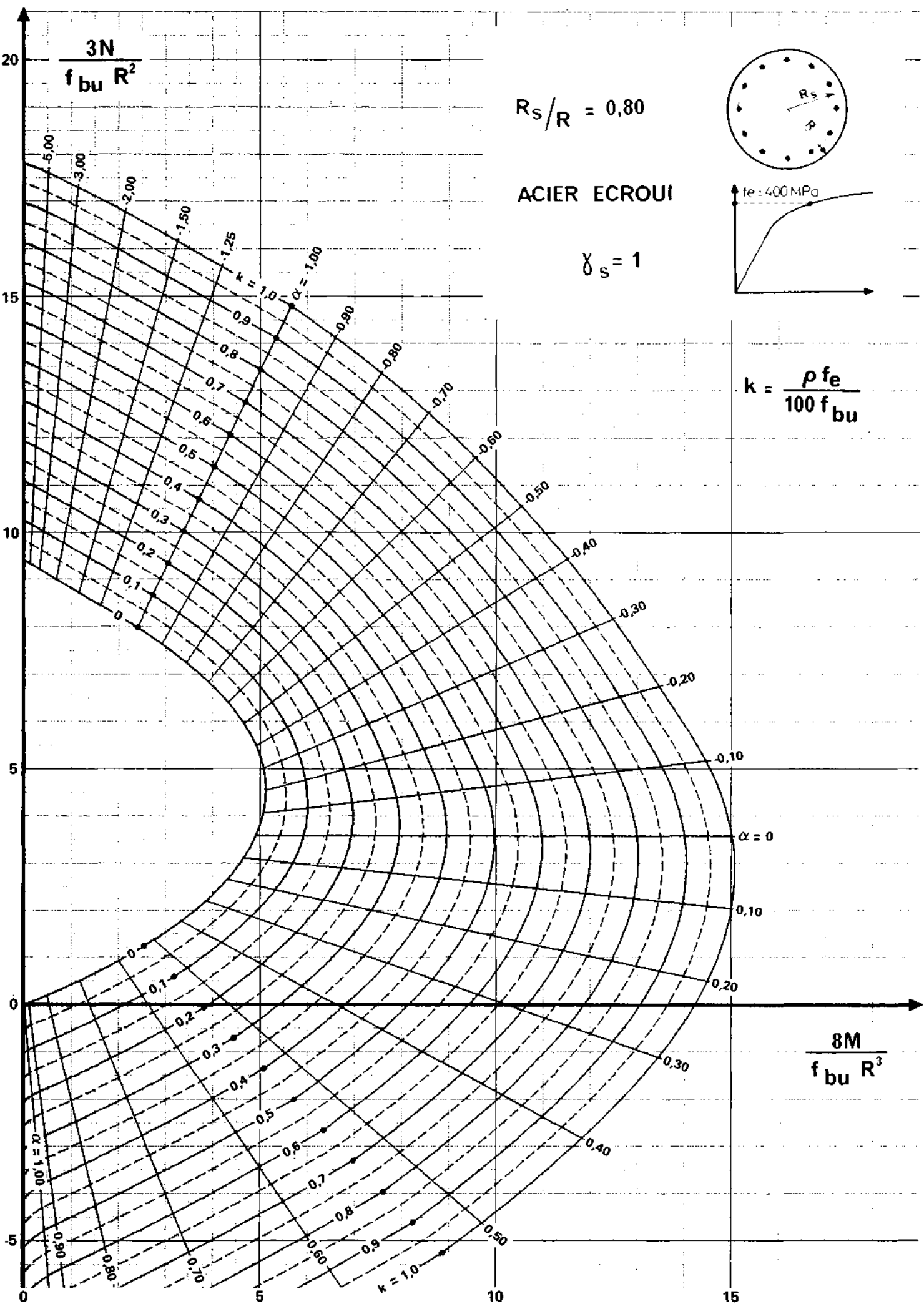
ACIER NATUREL

$$\gamma_s = 1$$



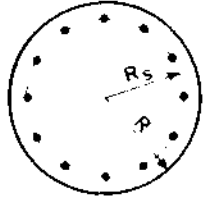
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$





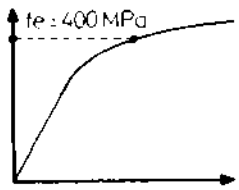
$$\frac{3N}{f_{bu} R^2}$$

$$R_s/R = 0,80$$



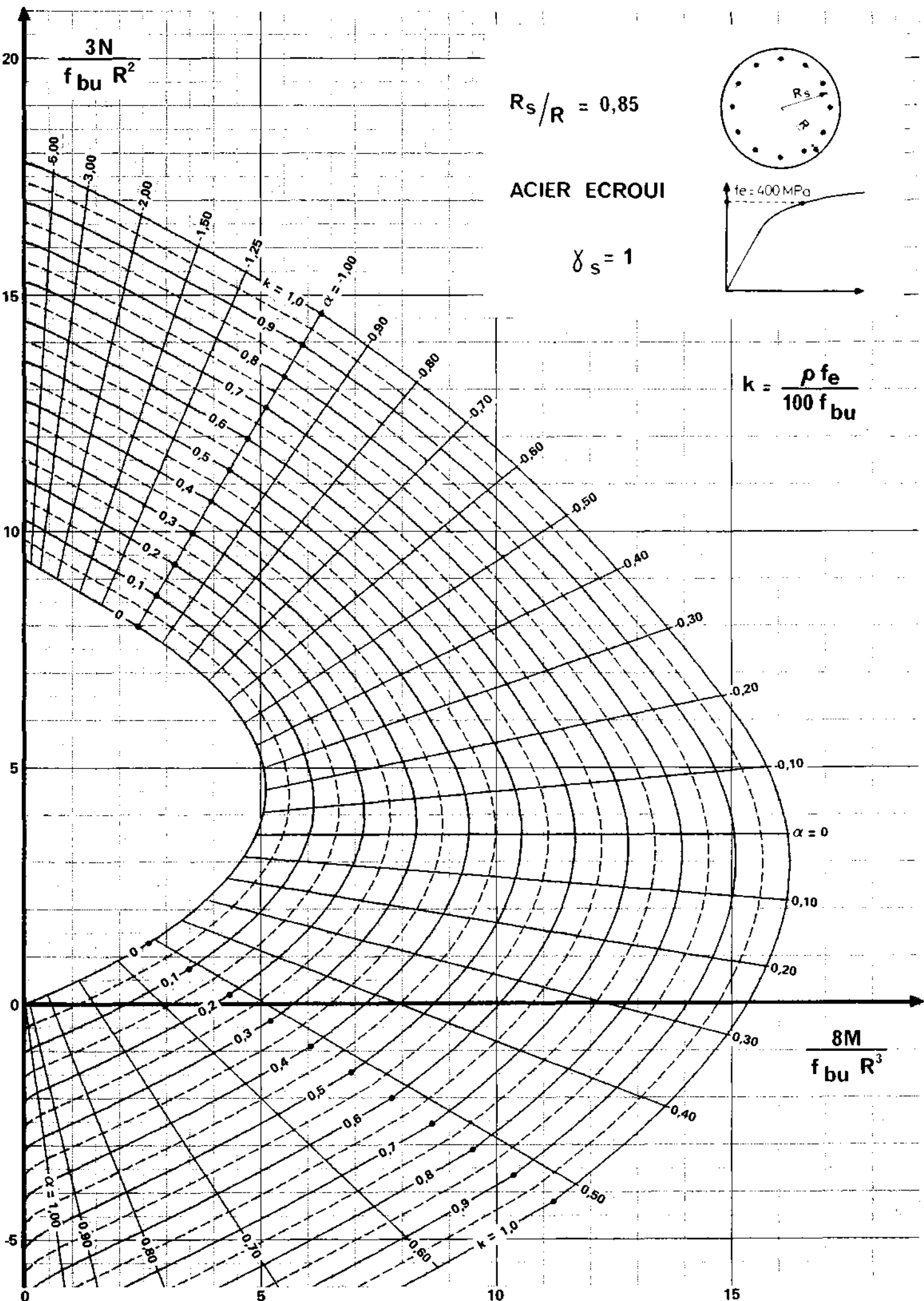
ACIER ECROUI

$$\gamma_s = 1$$



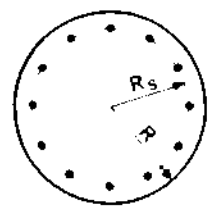
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$



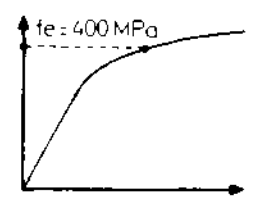


$$\frac{3N}{f_{bu} R^2}$$

$$R_s/R = 0,85$$

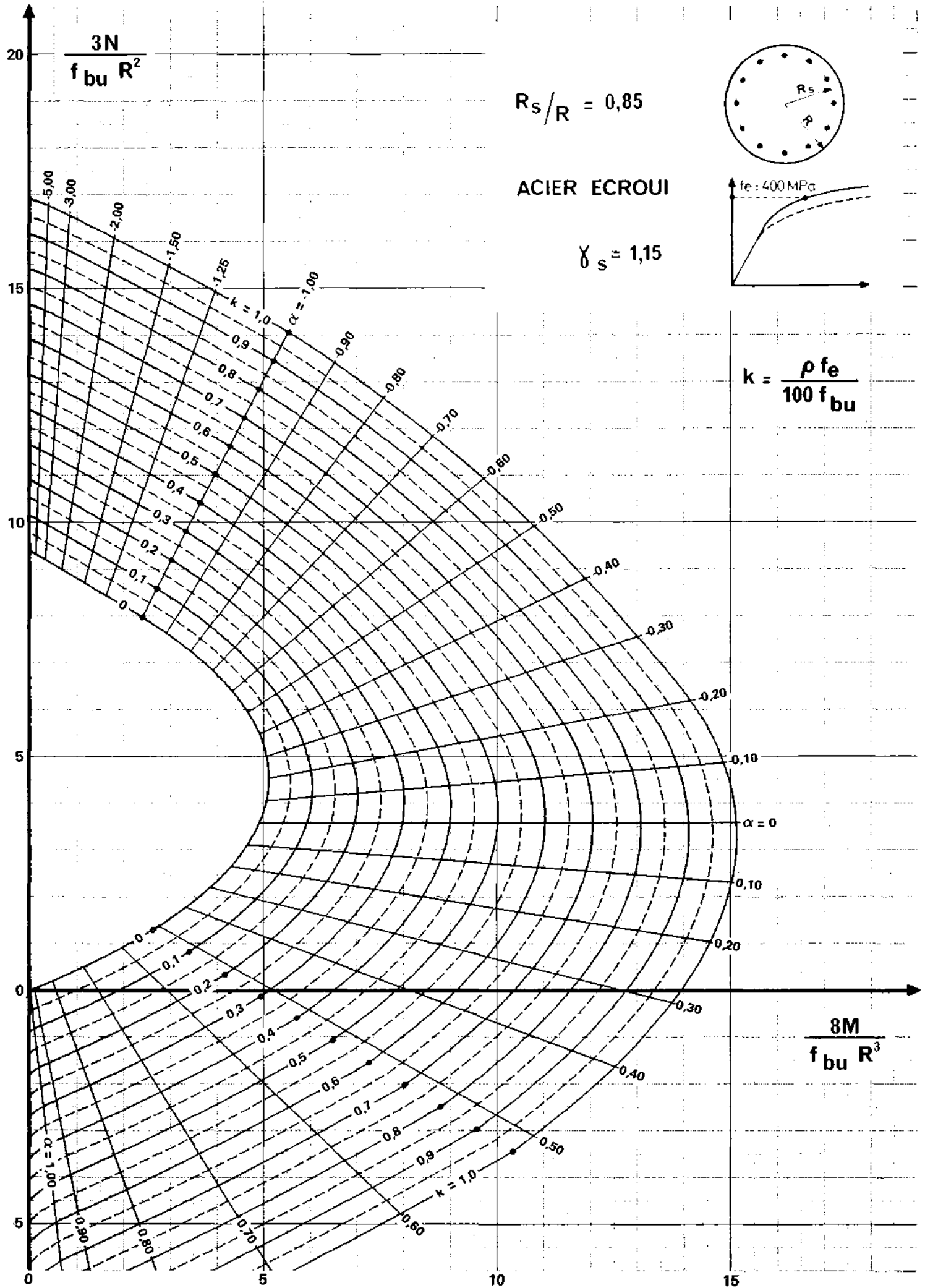


ACIER ECROUI

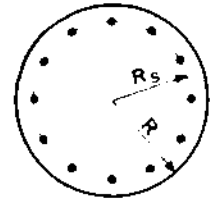


$$\gamma_s = 1$$

$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

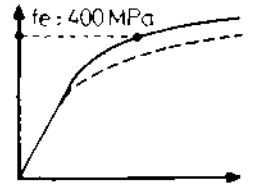


$$R_s/R = 0,85$$

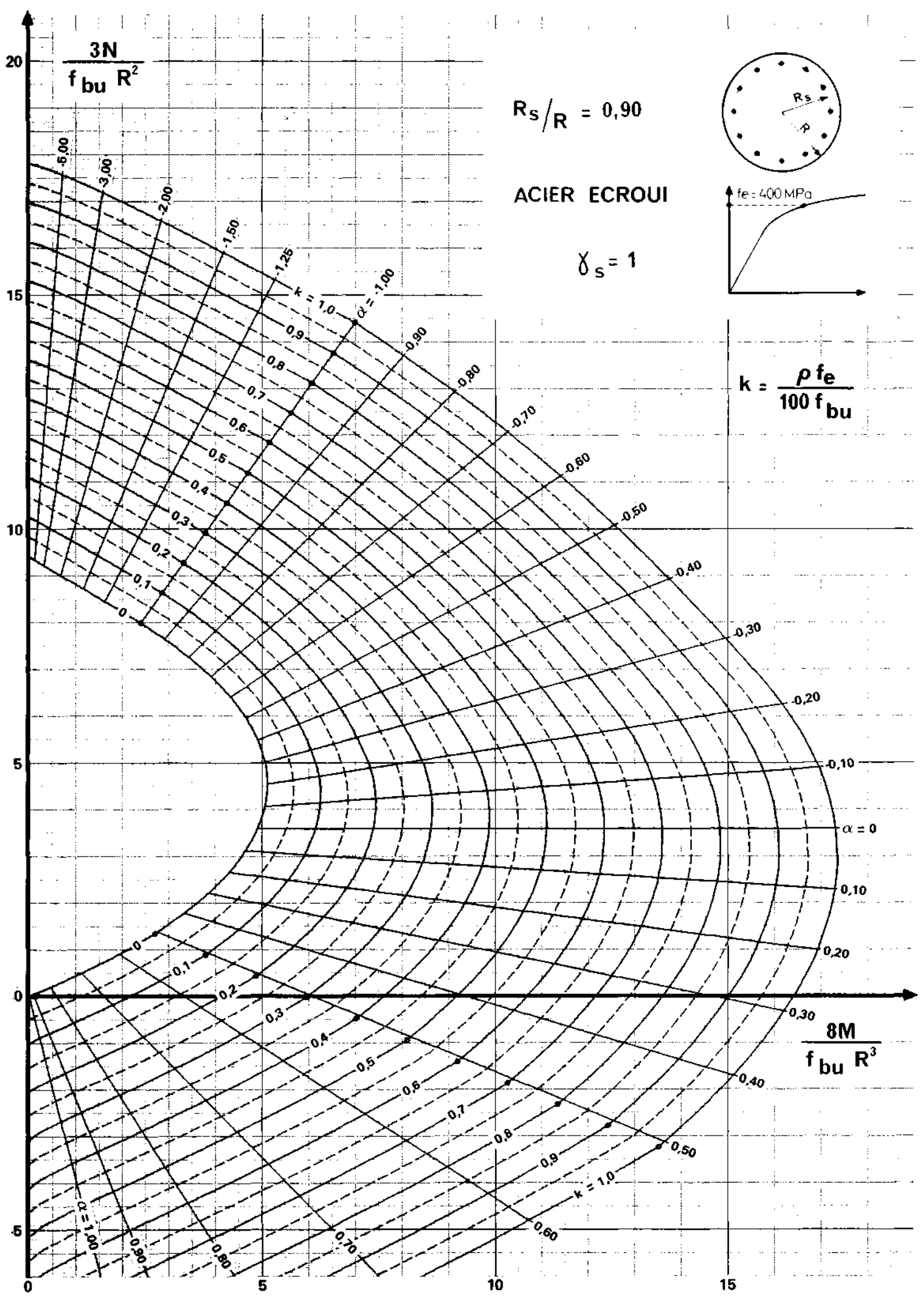


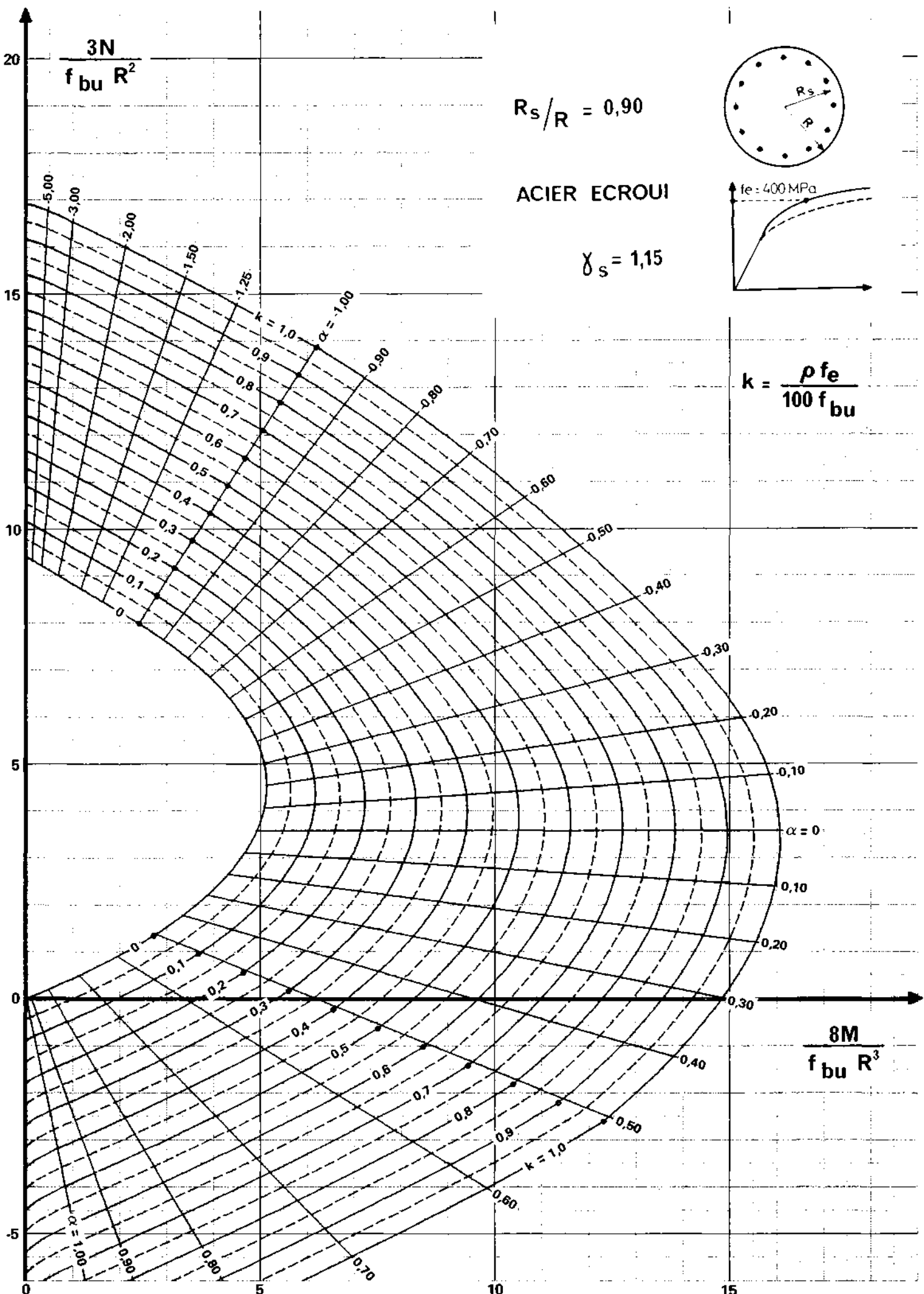
ACIER ECROUI

$$\gamma_s = 1,15$$



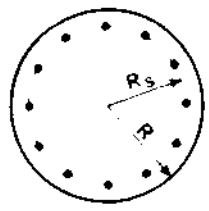
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$



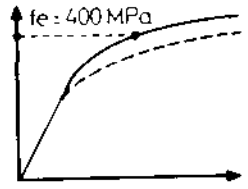


$$\frac{3N}{f_{bu} R^2}$$

$$R_s/R = 0,90$$



ACIER ECROUI



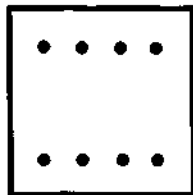
$$\gamma_s = 1,15$$

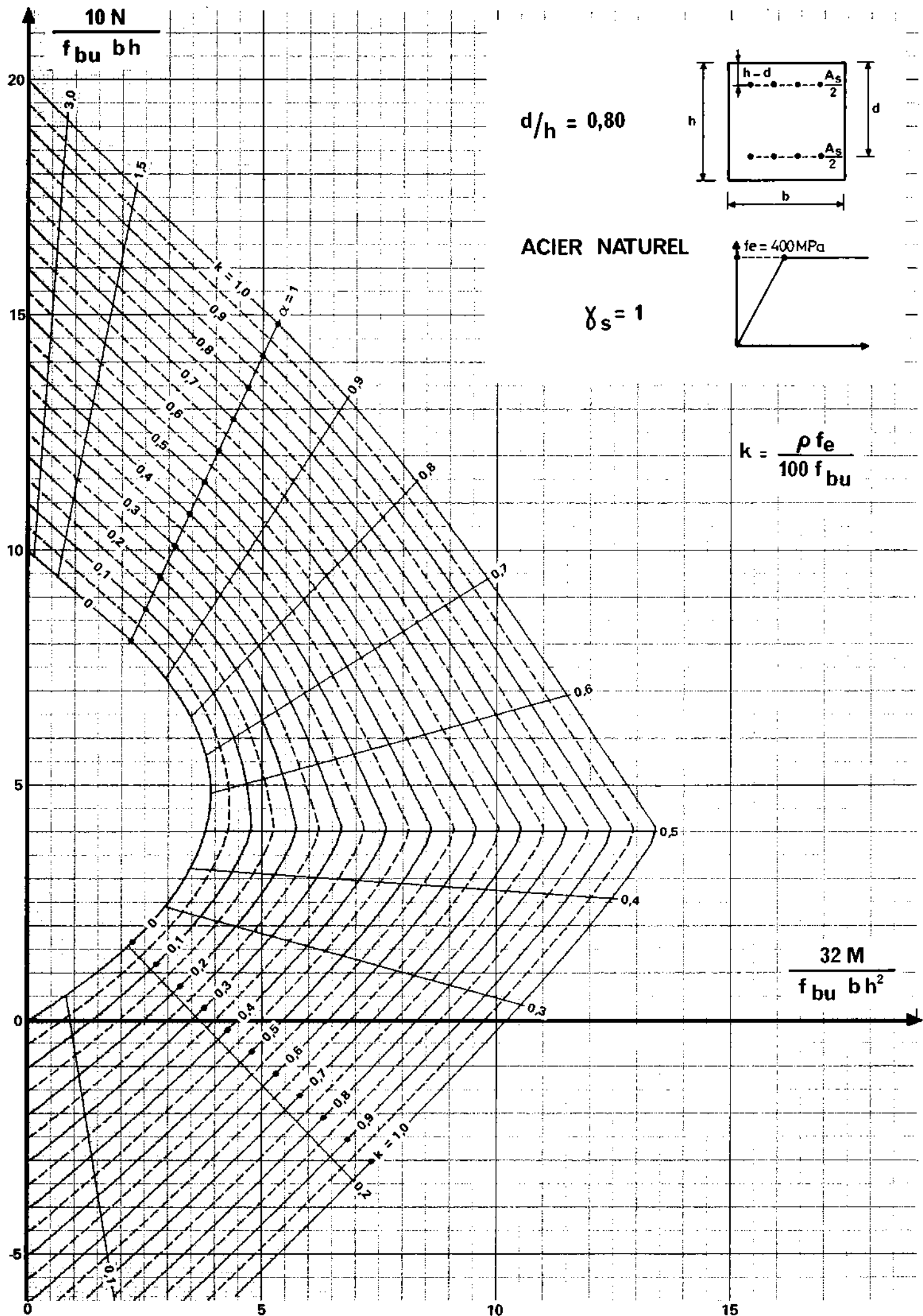
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

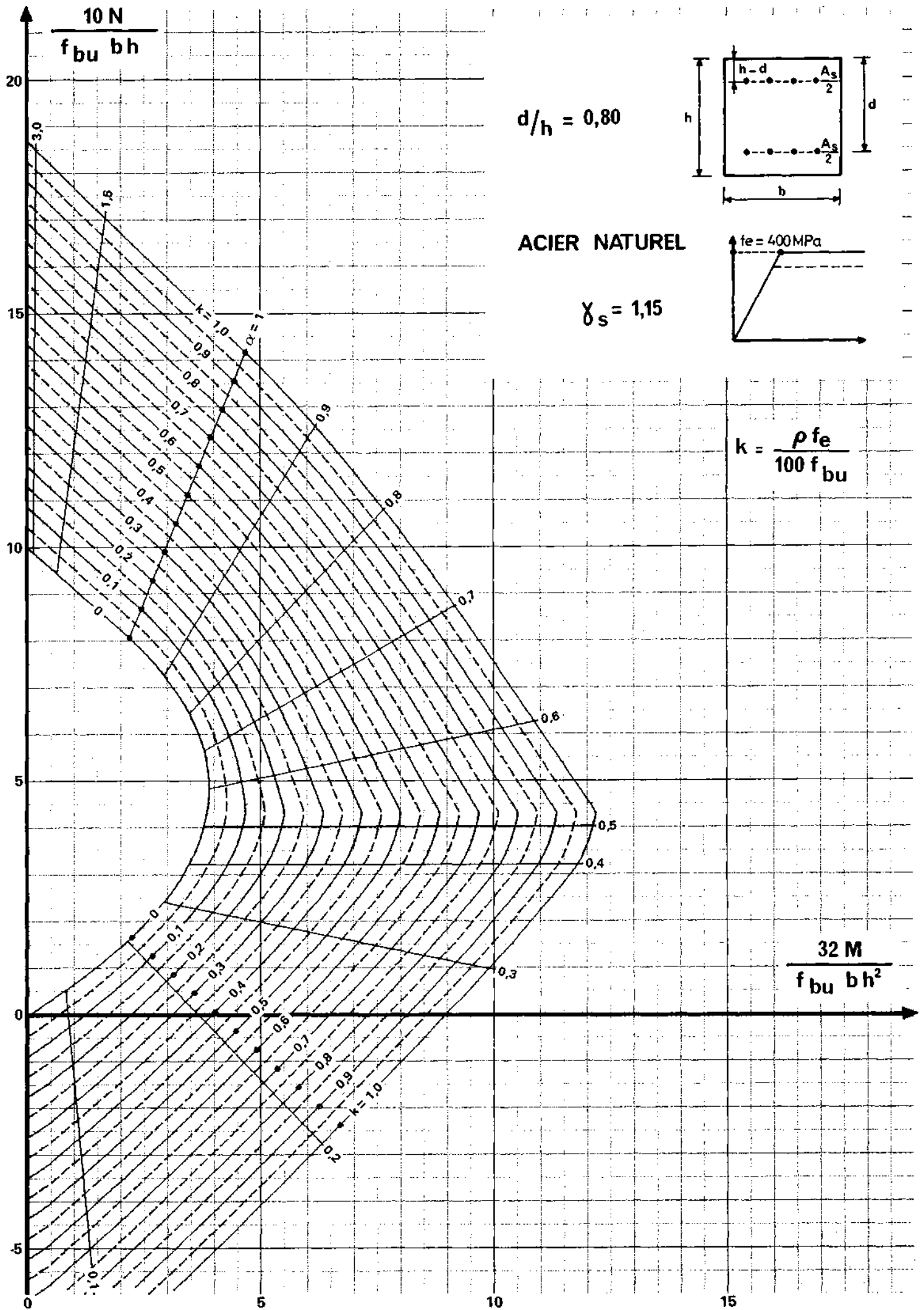


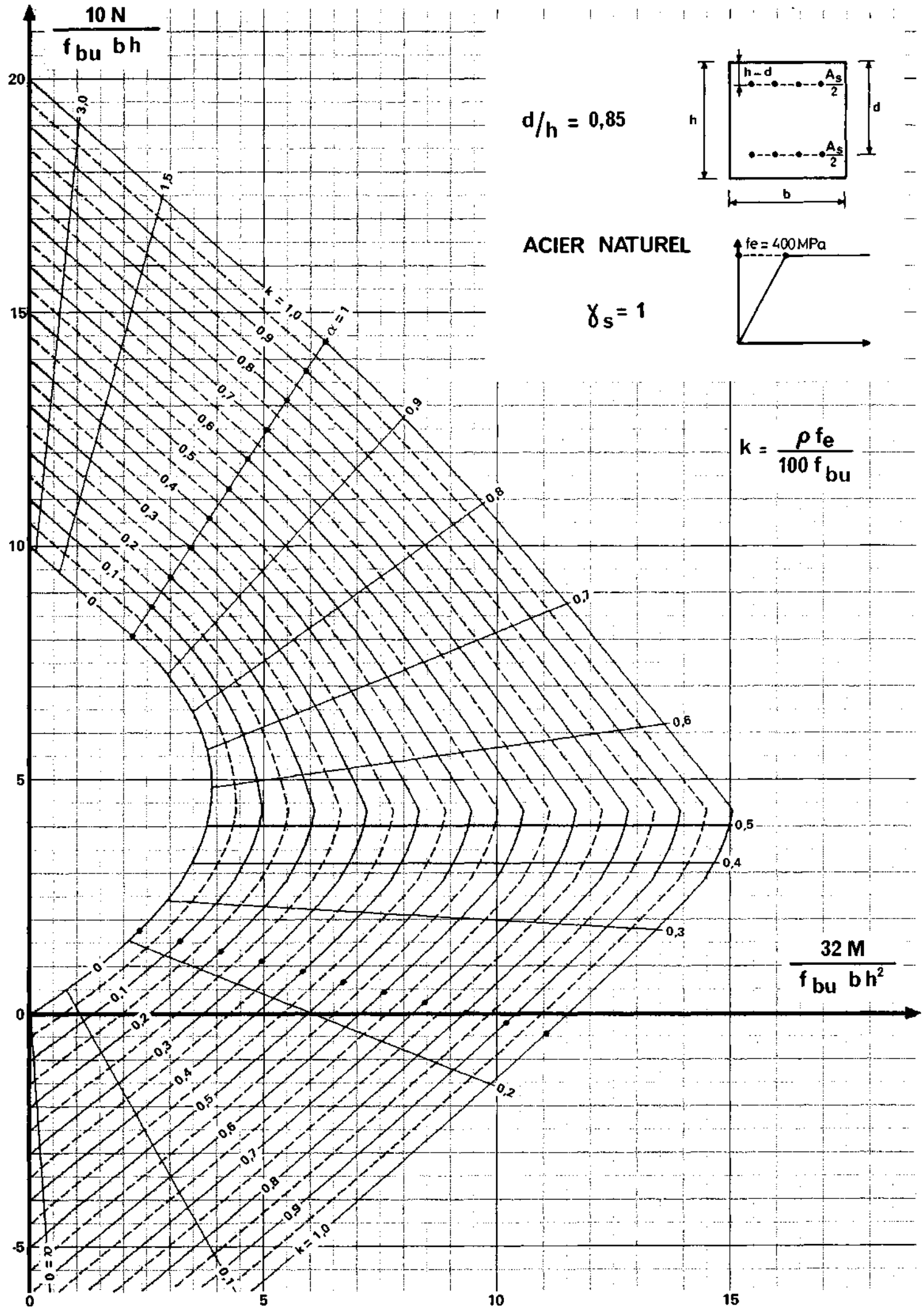
## ***ETAT-LIMITE ULTIME***

Section rectangulaire  
2 nappes d'armatures

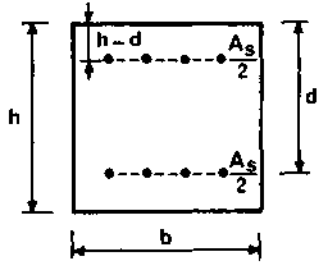






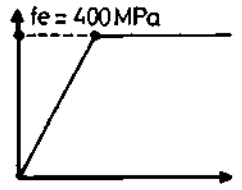


$$d/h = 0,85$$



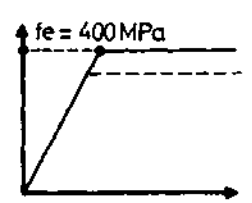
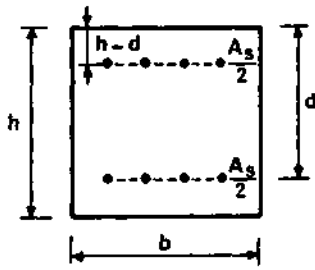
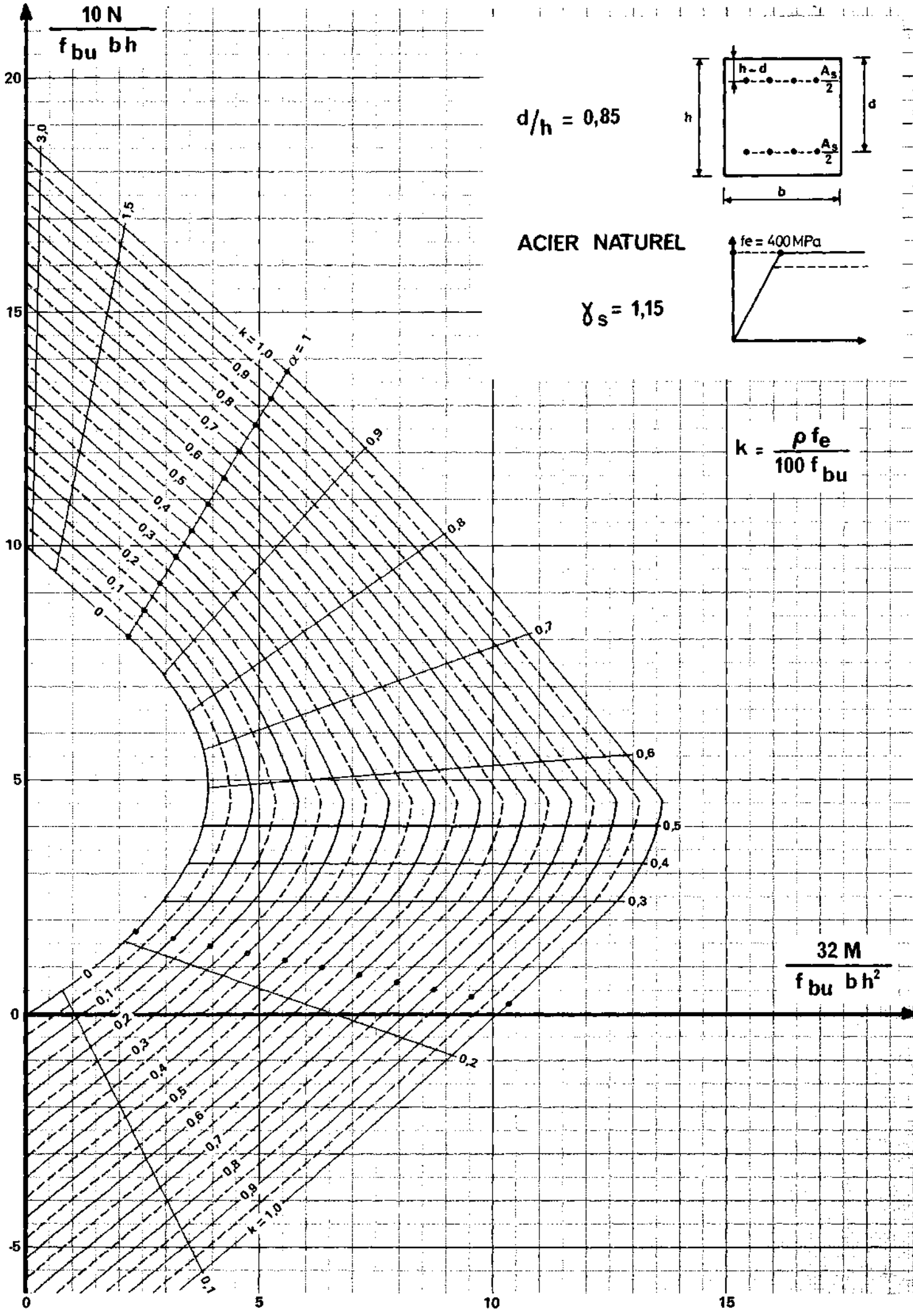
ACIER NATUREL

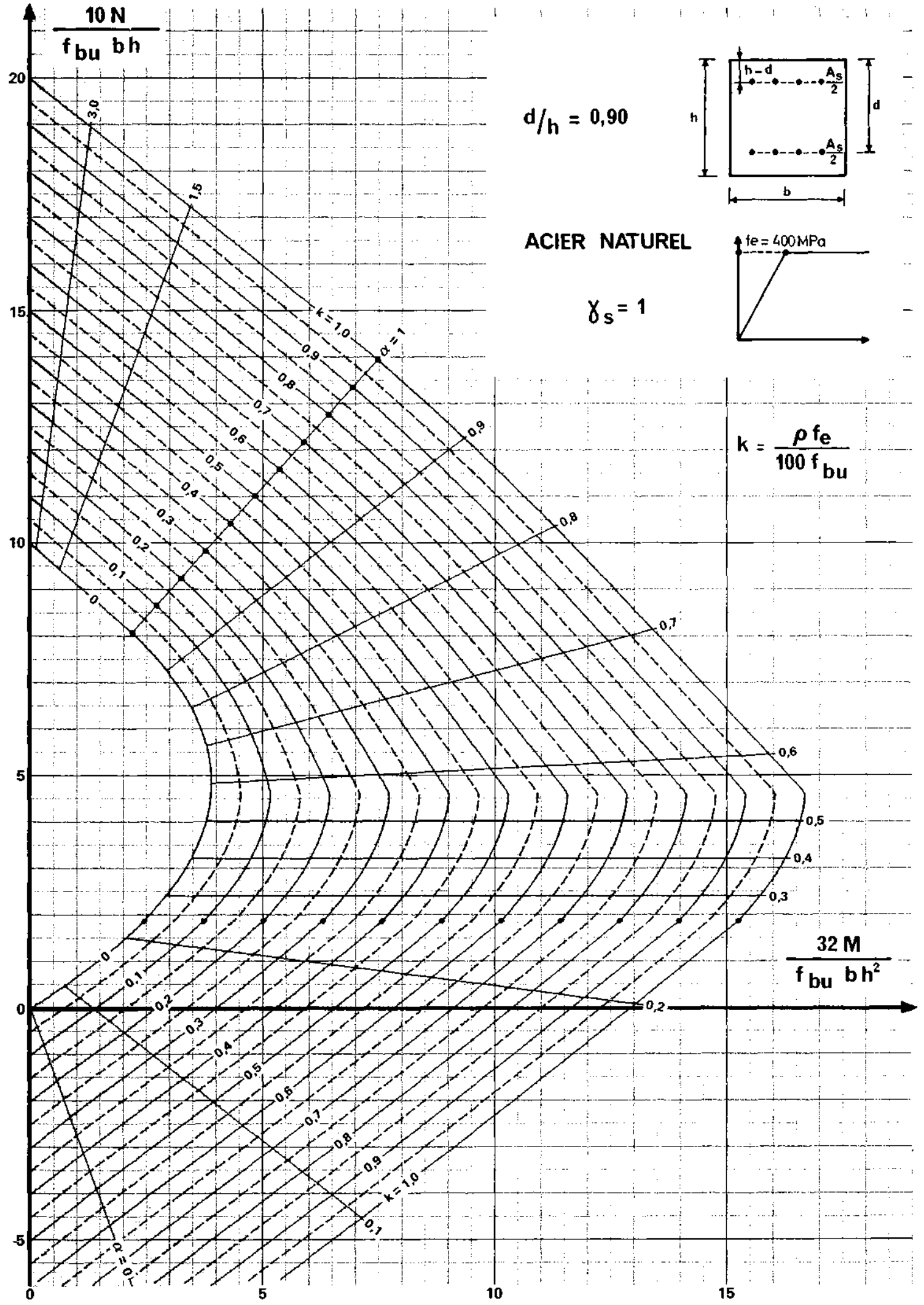
$$\gamma_s = 1$$

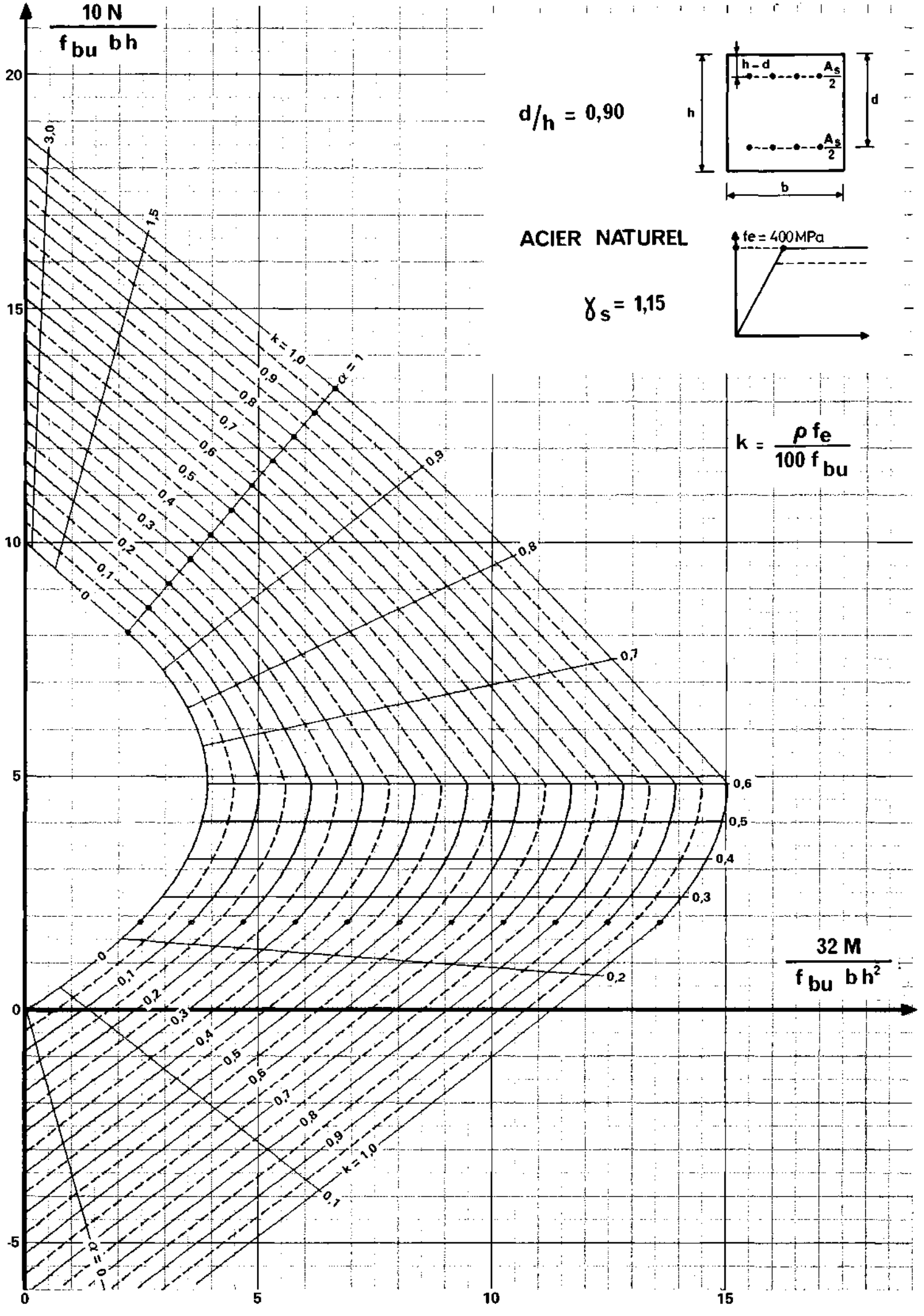


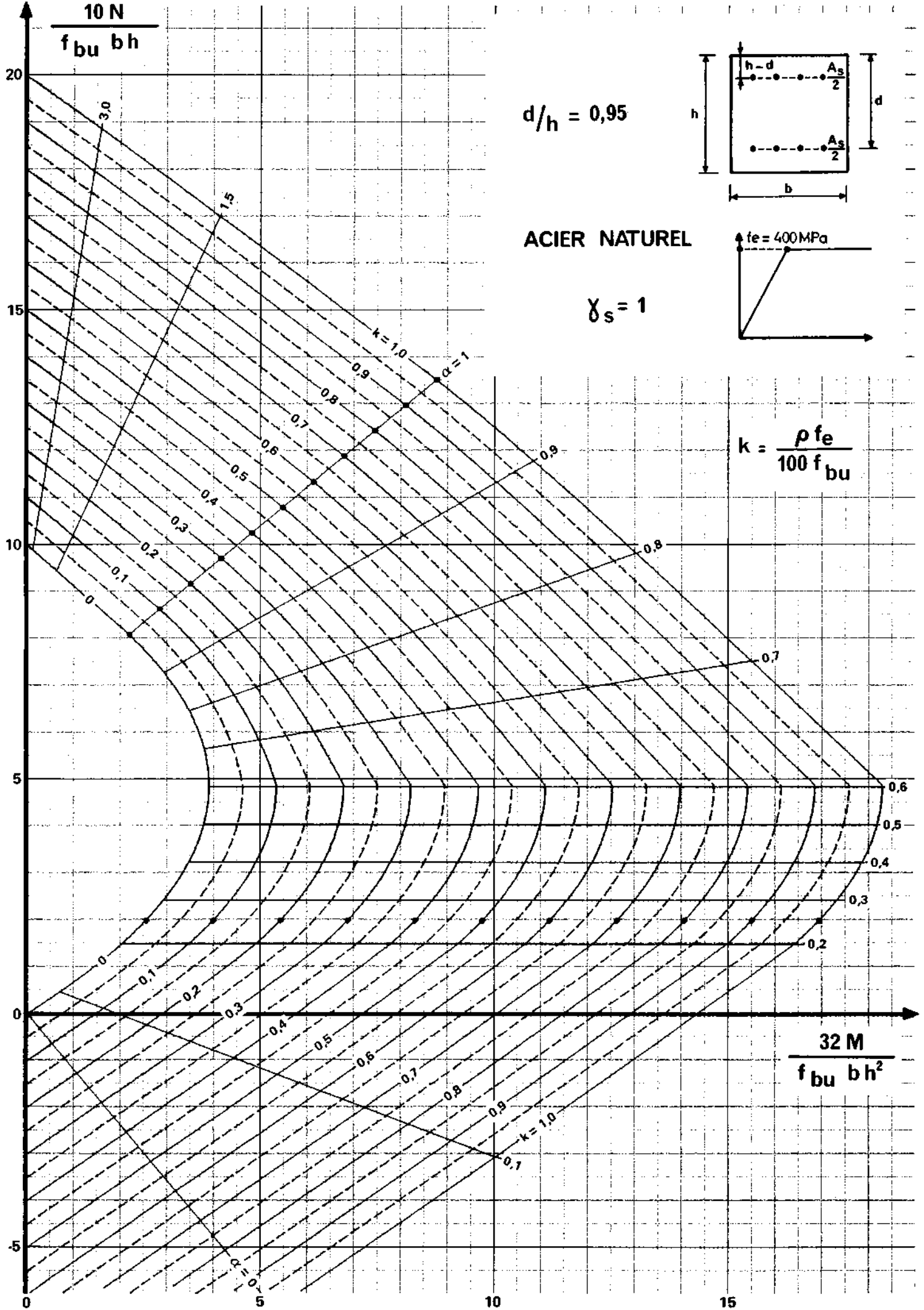
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

$$\frac{32 M}{f_{bu} b h^2}$$

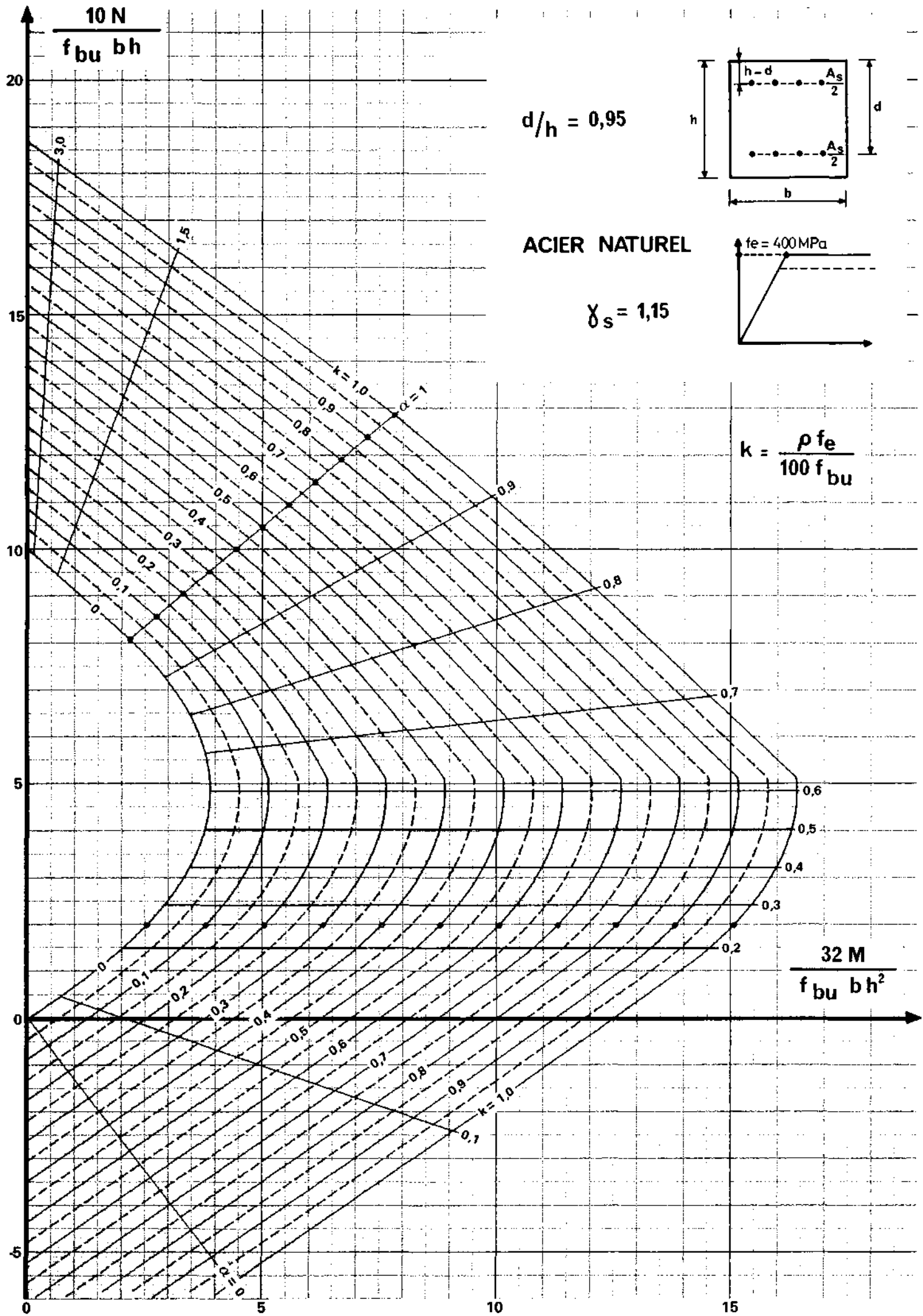


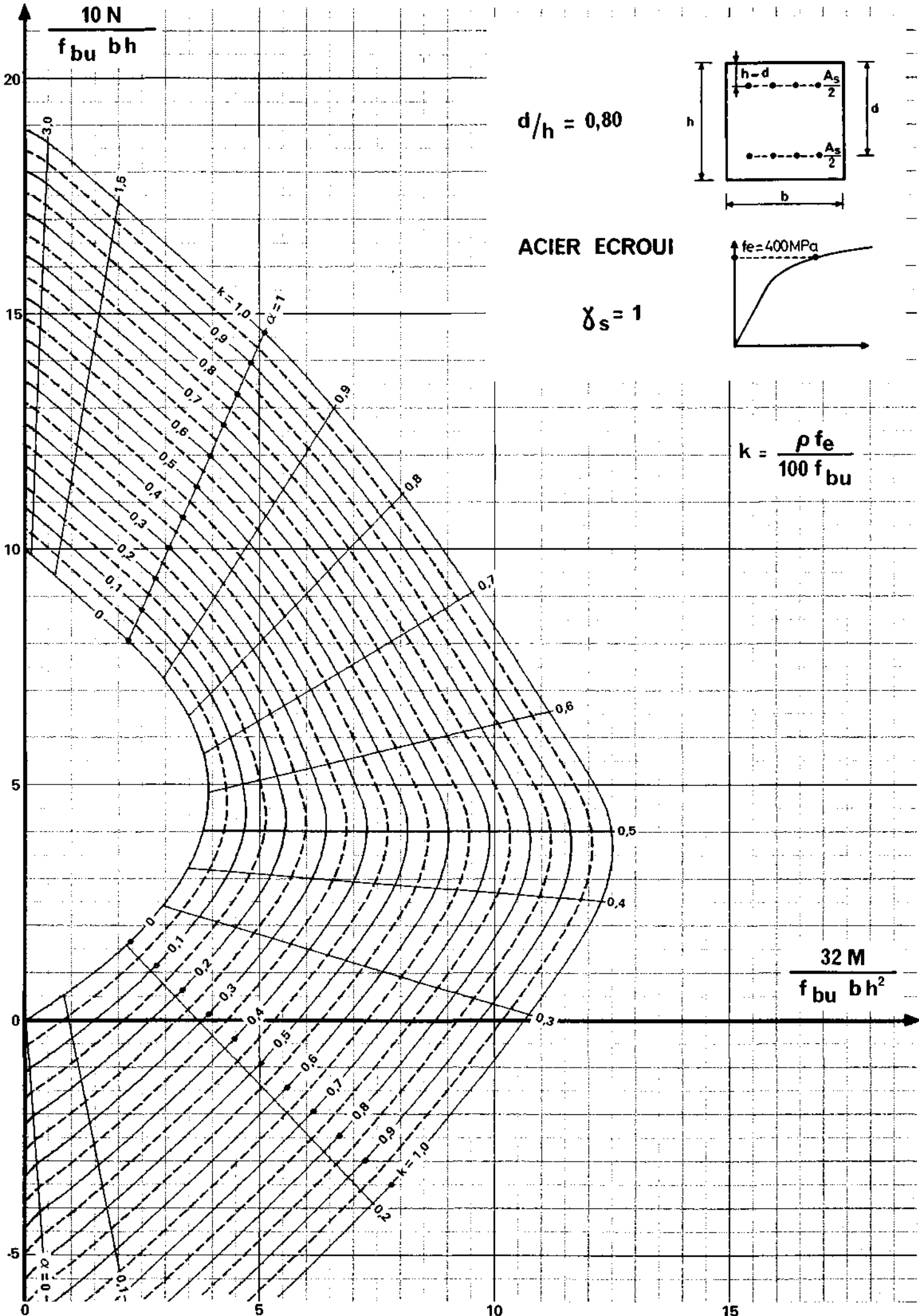




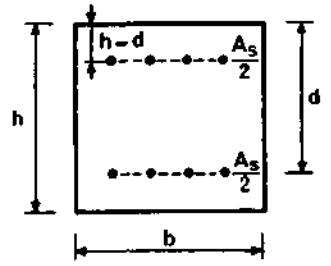








$d/h = 0,80$

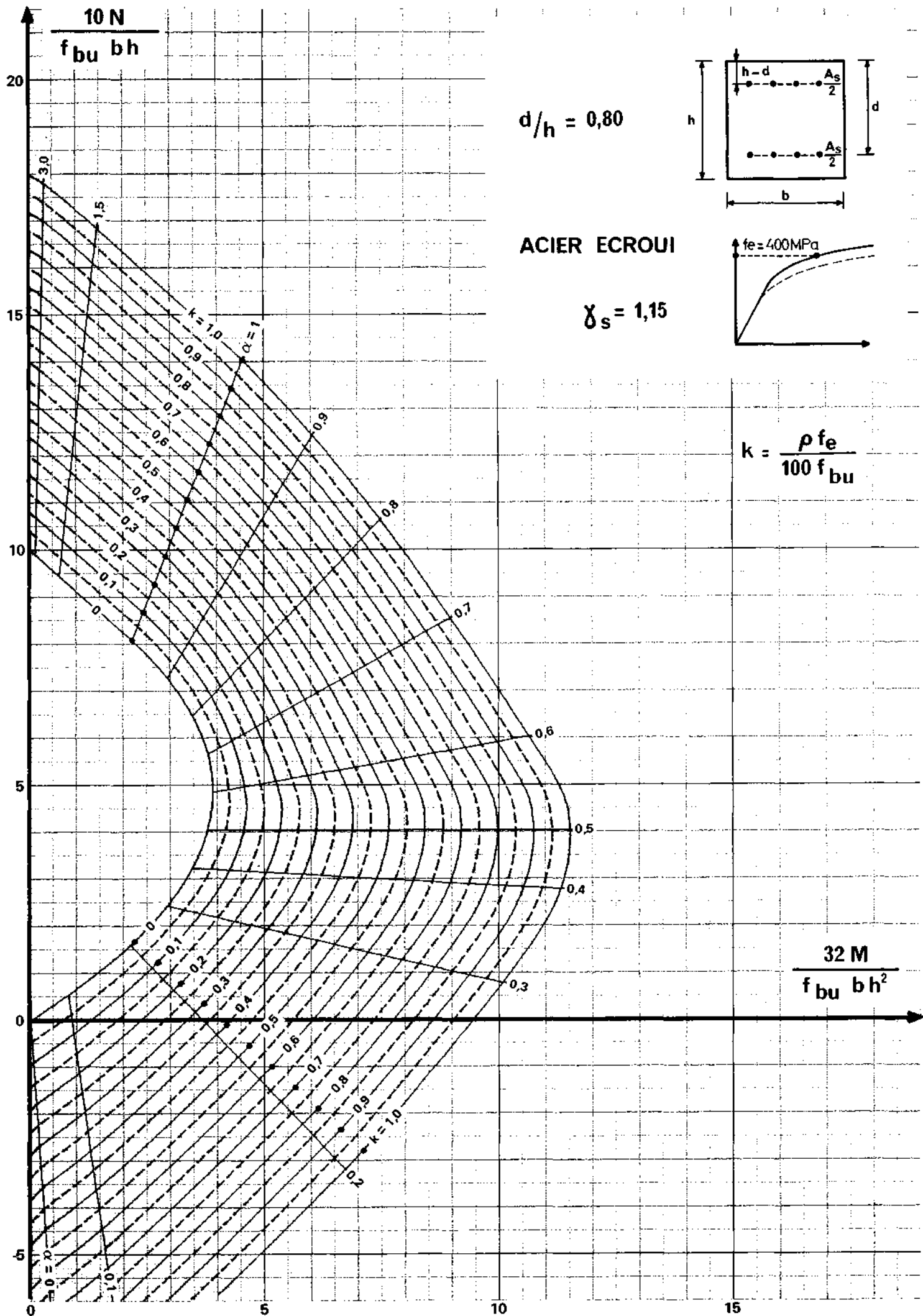


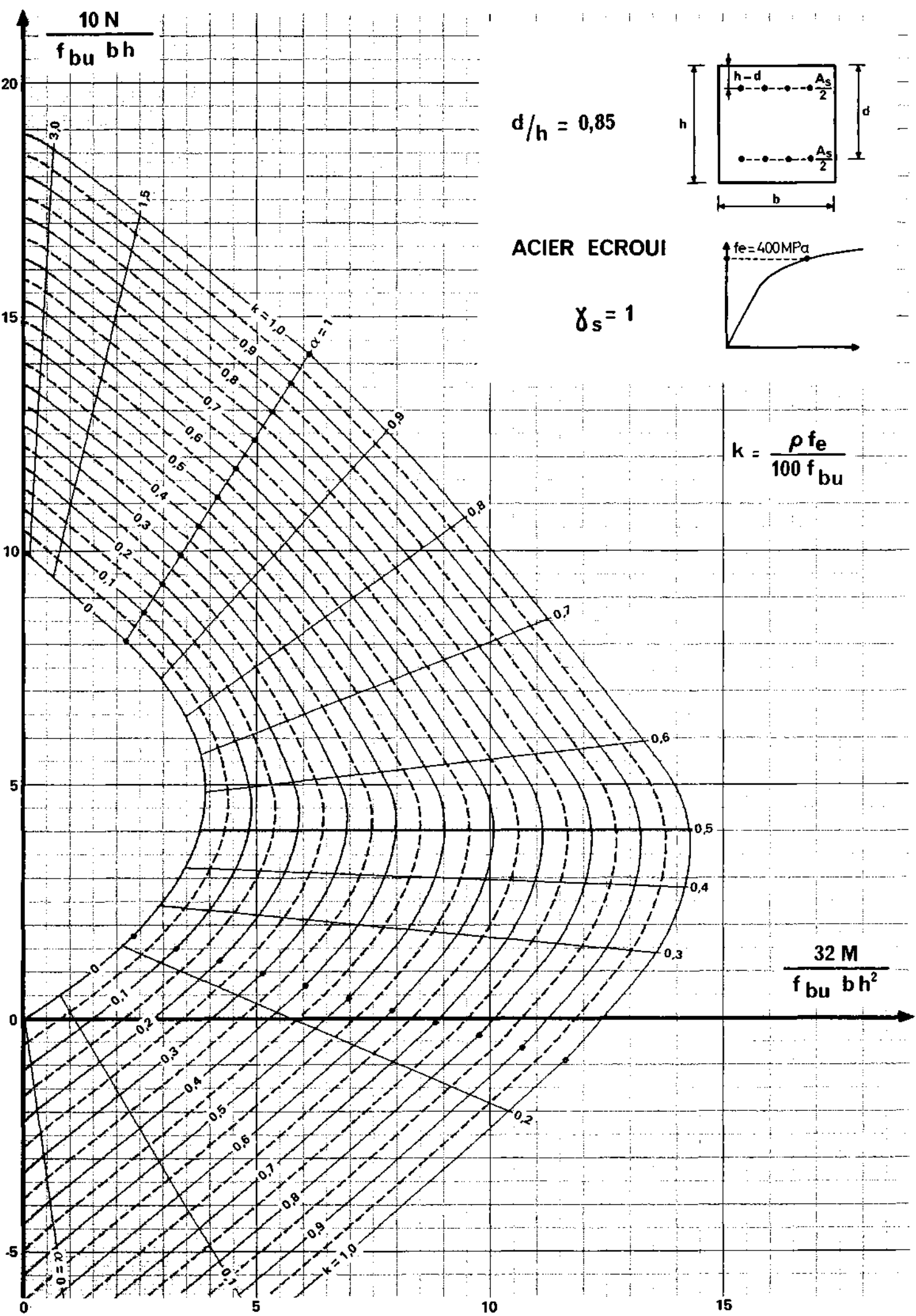
ACIER ECROUI

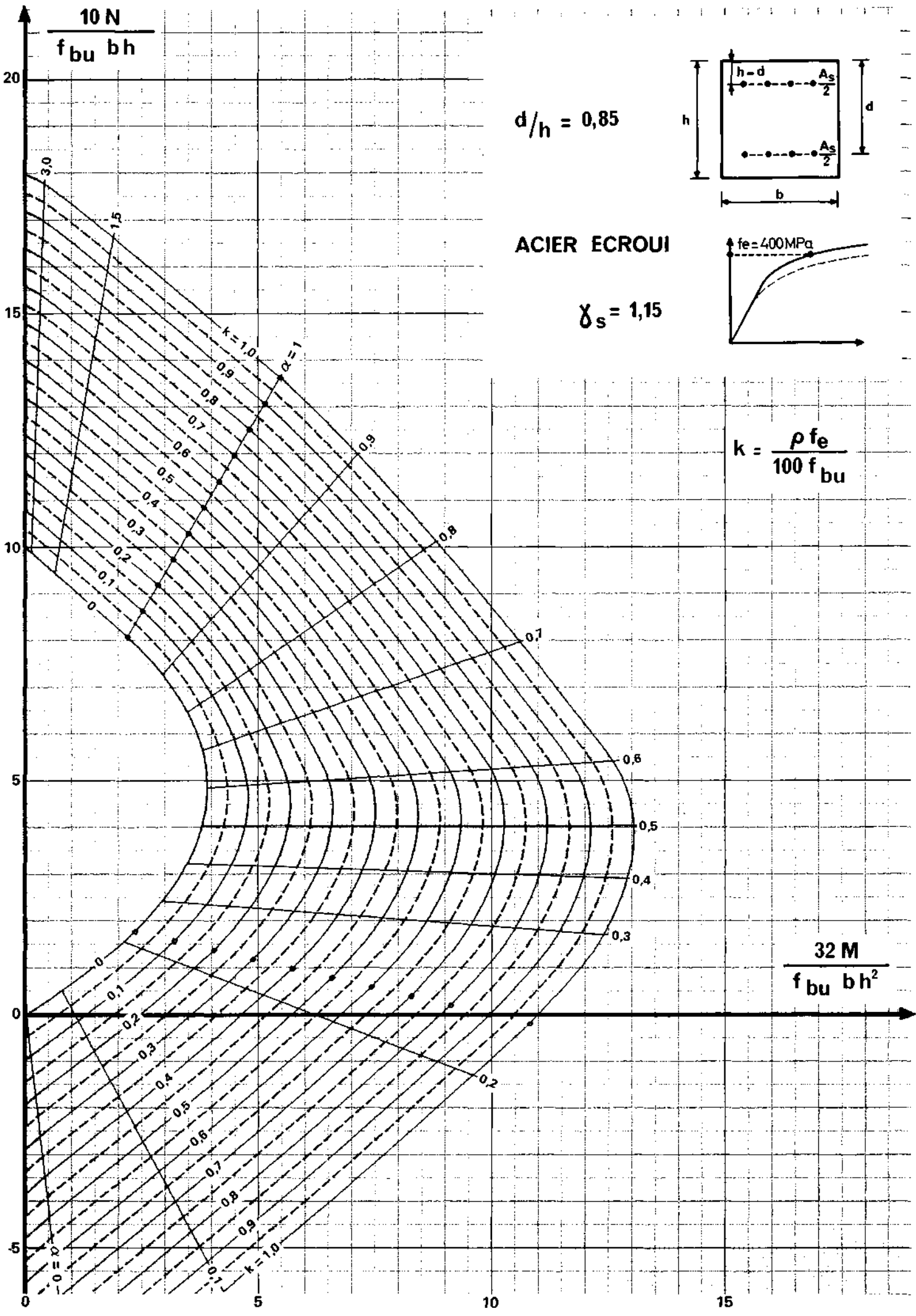
$\gamma_s = 1$

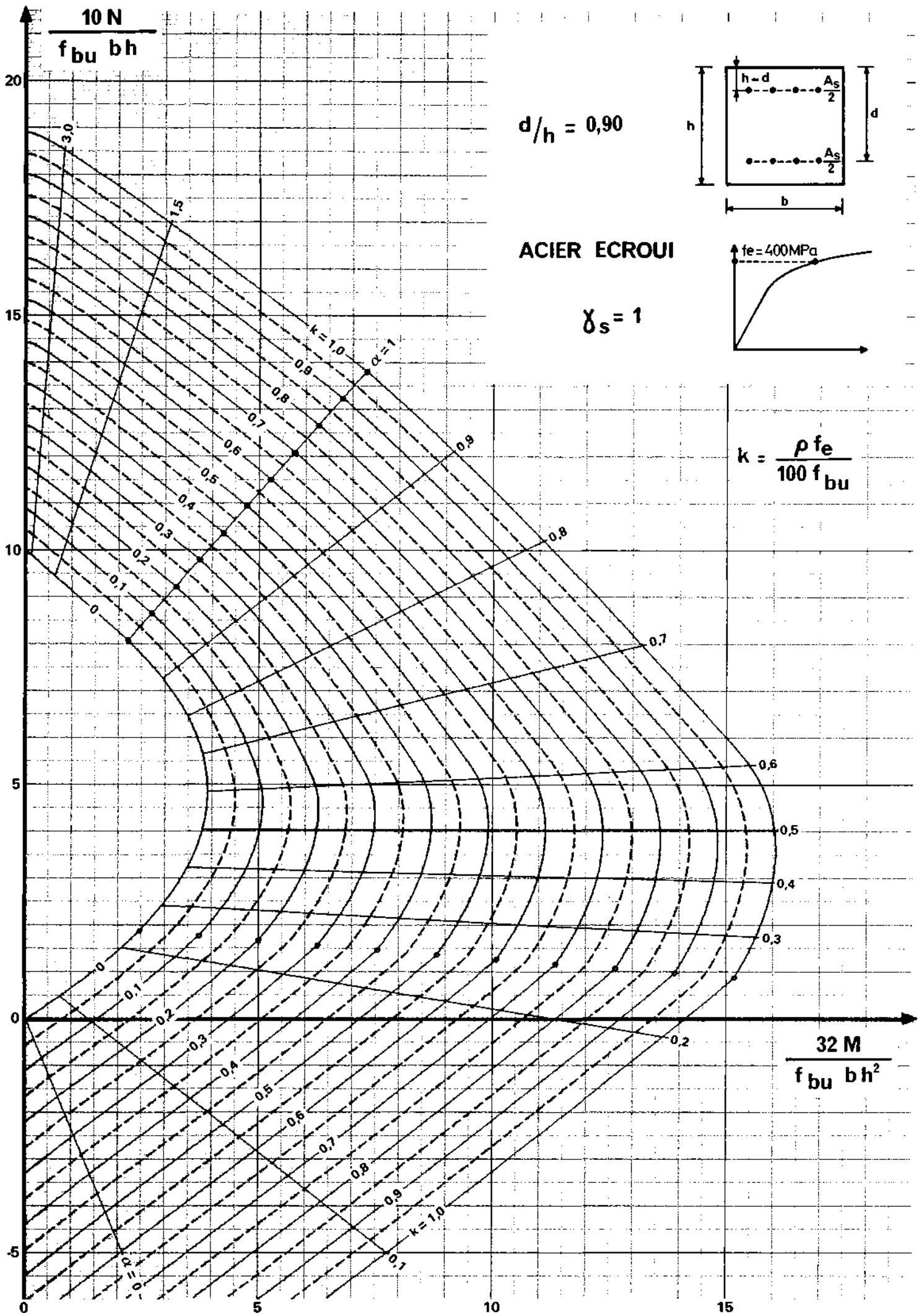


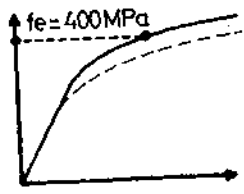
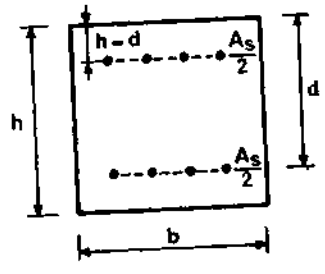
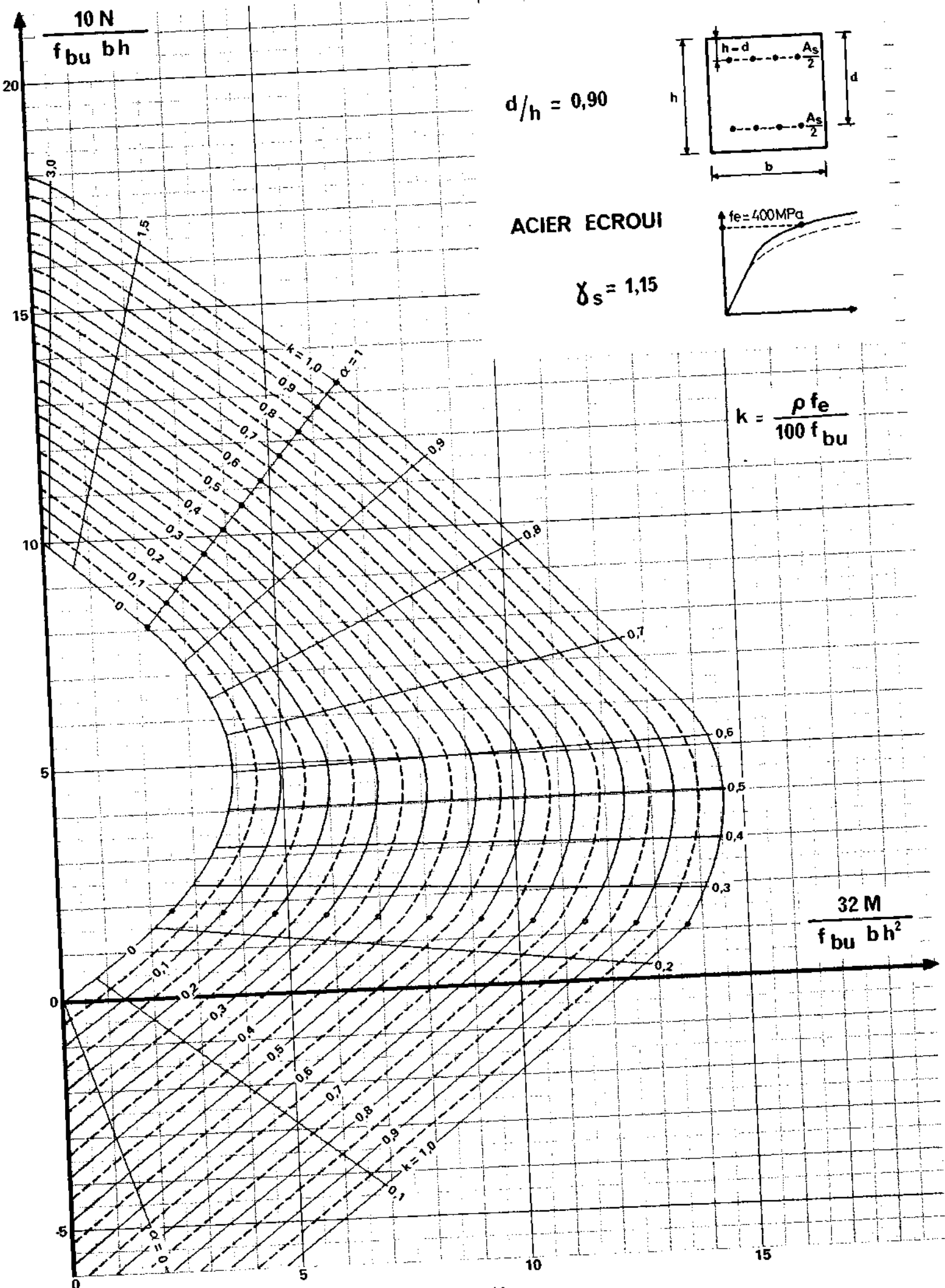
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

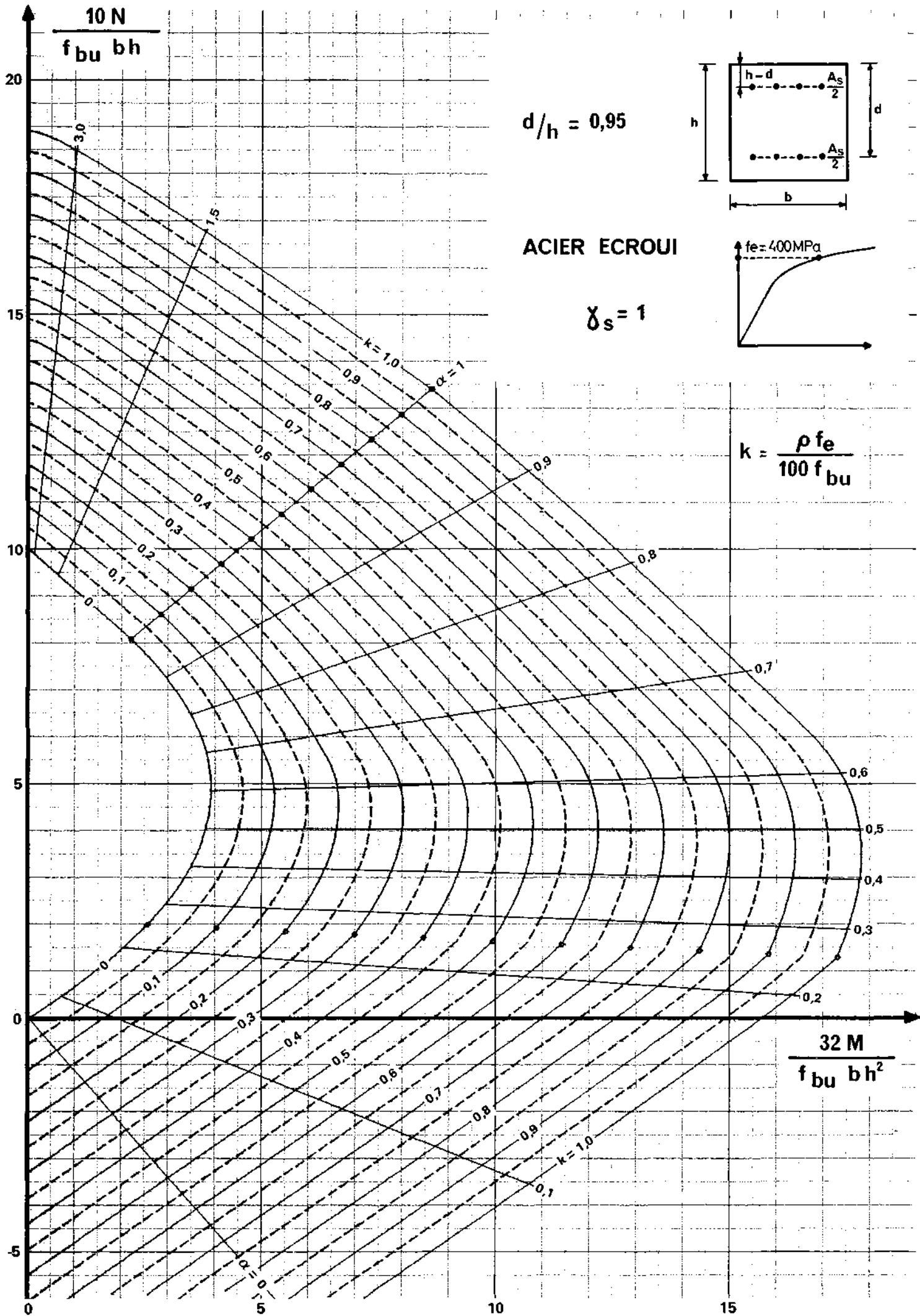




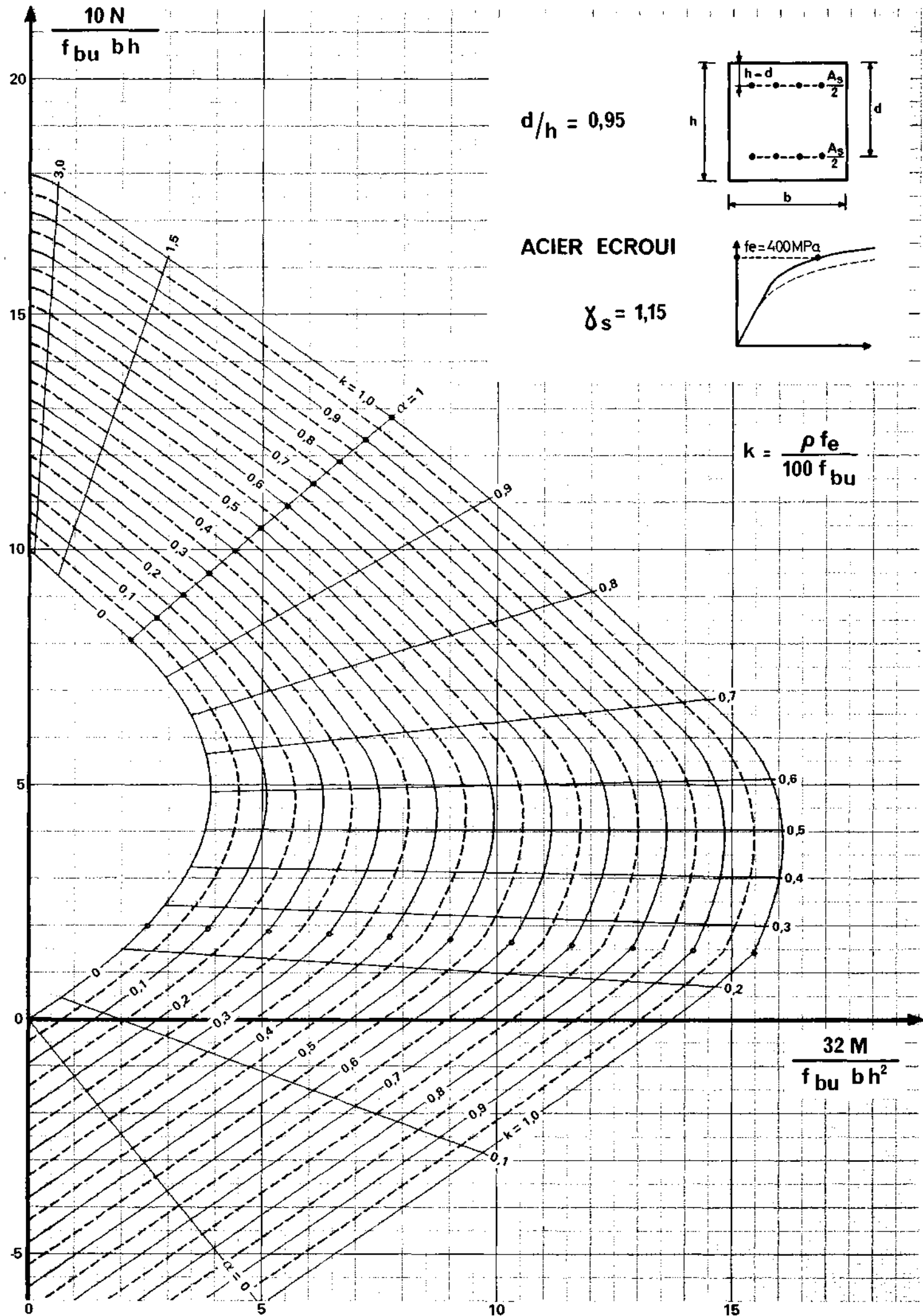






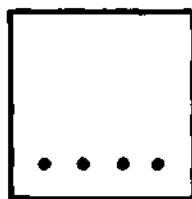


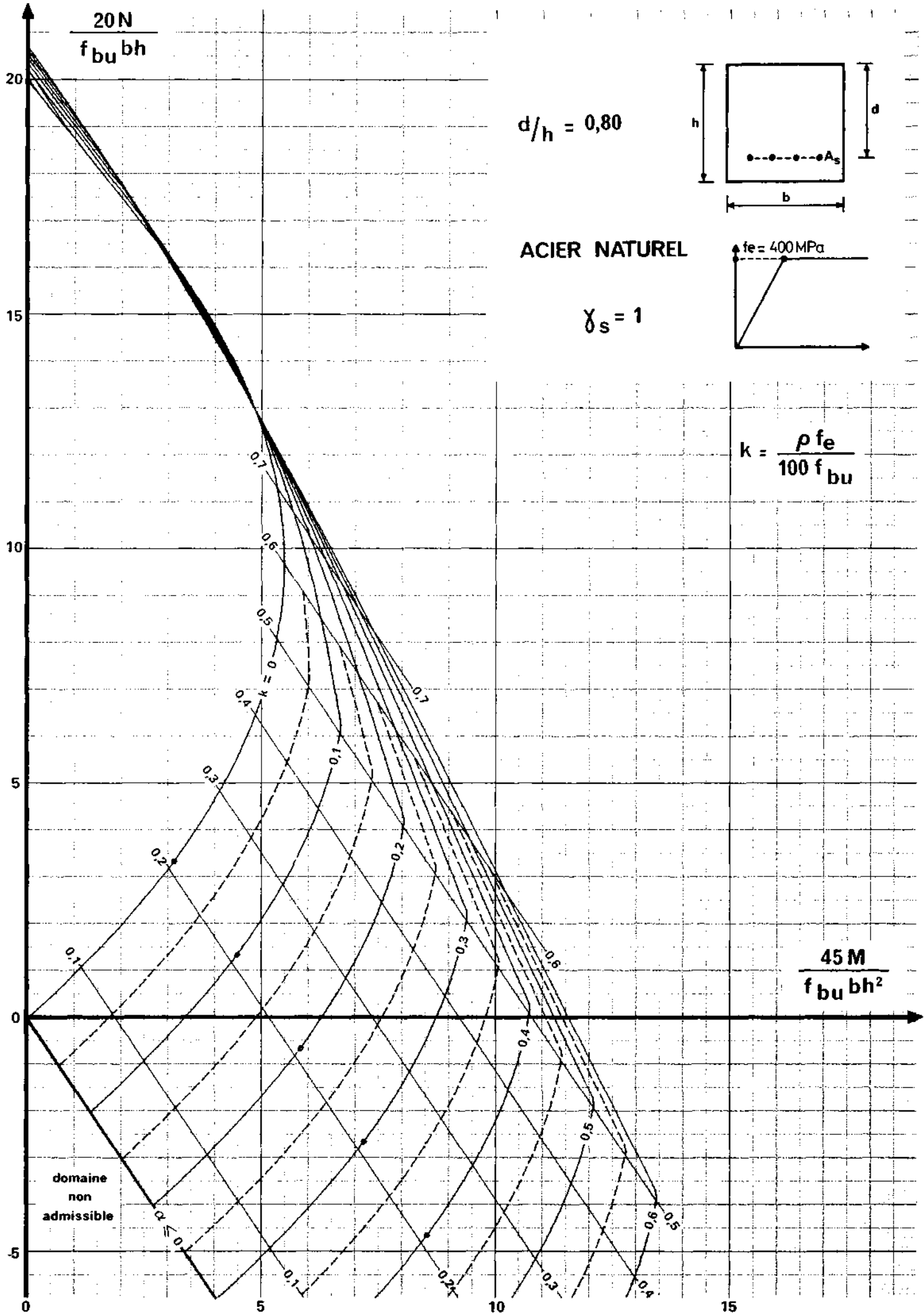


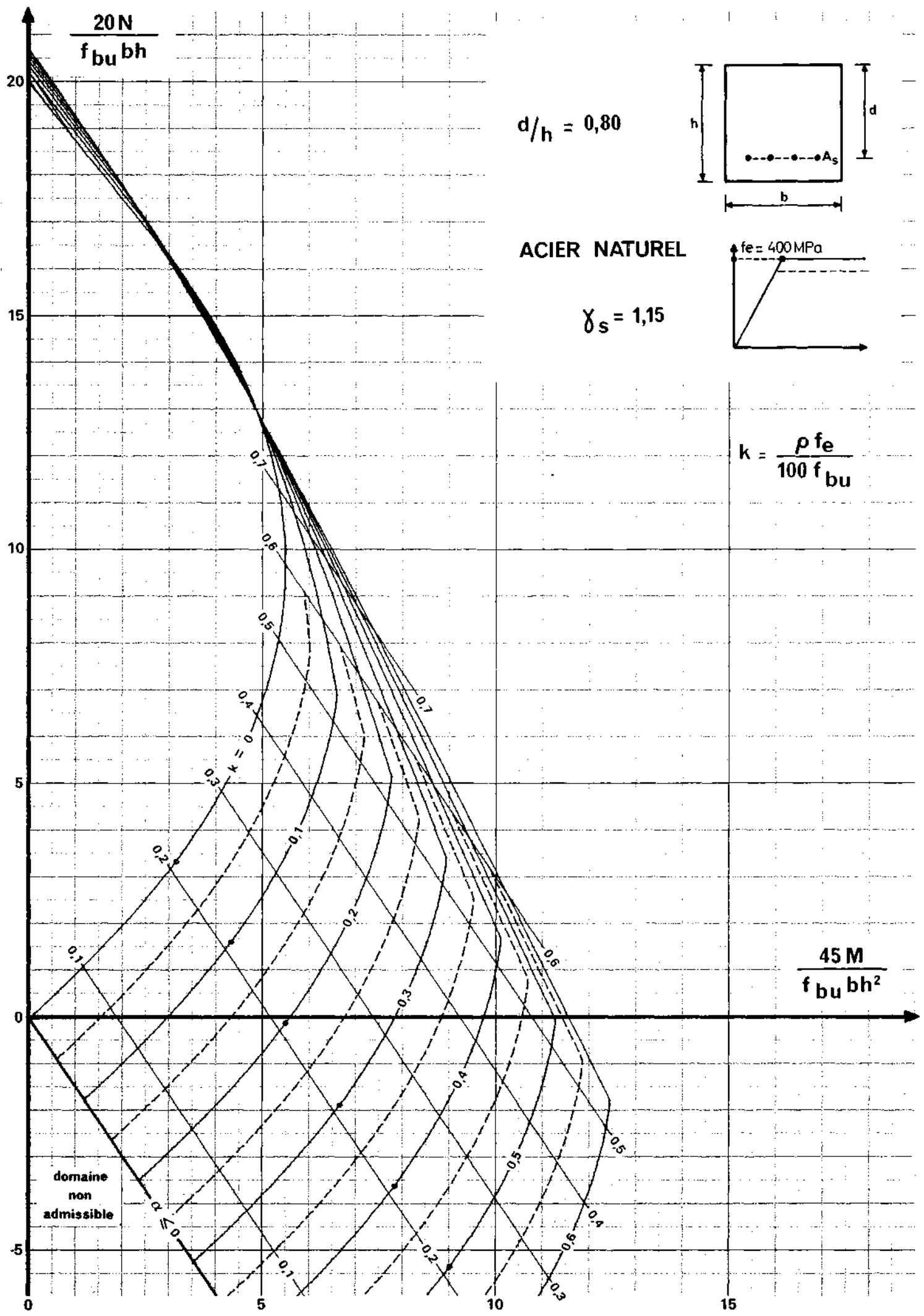


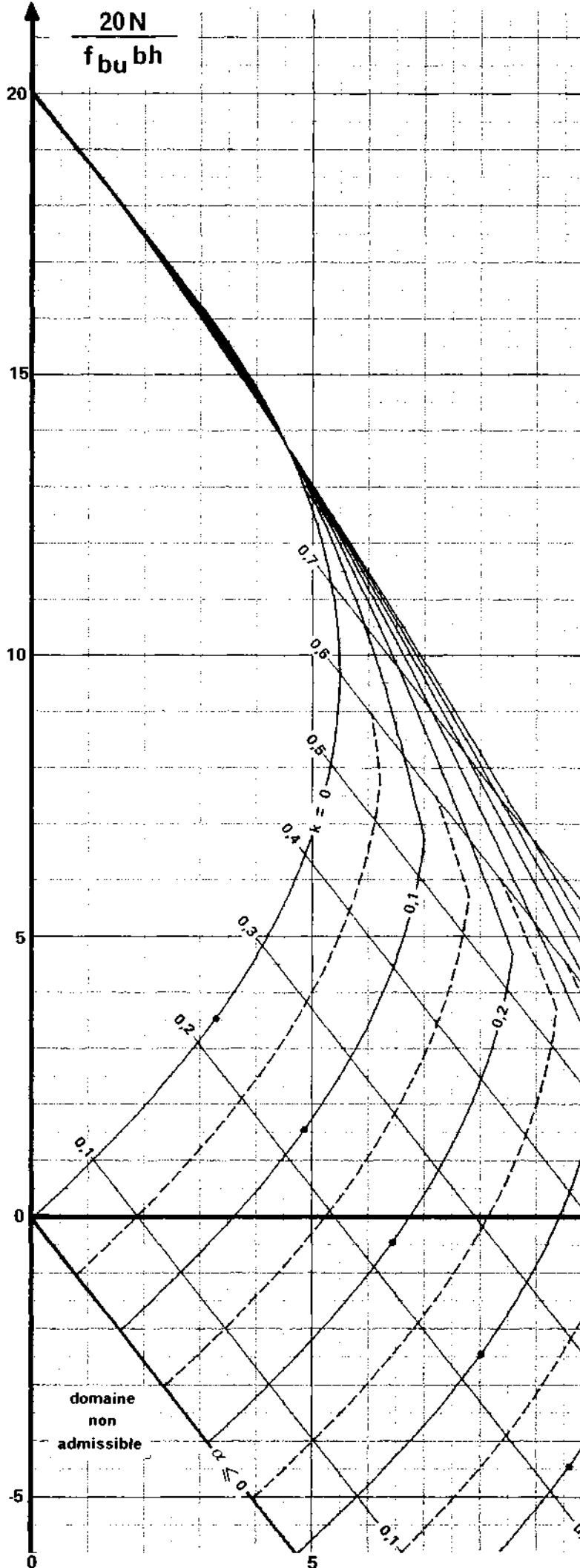
## ***ETAT-LIMITE ULTIME***

Section rectangulaire  
1 nappe d'armatures

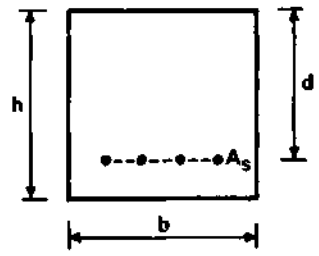






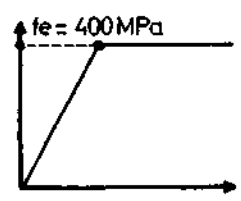


$d/h = 0,85$

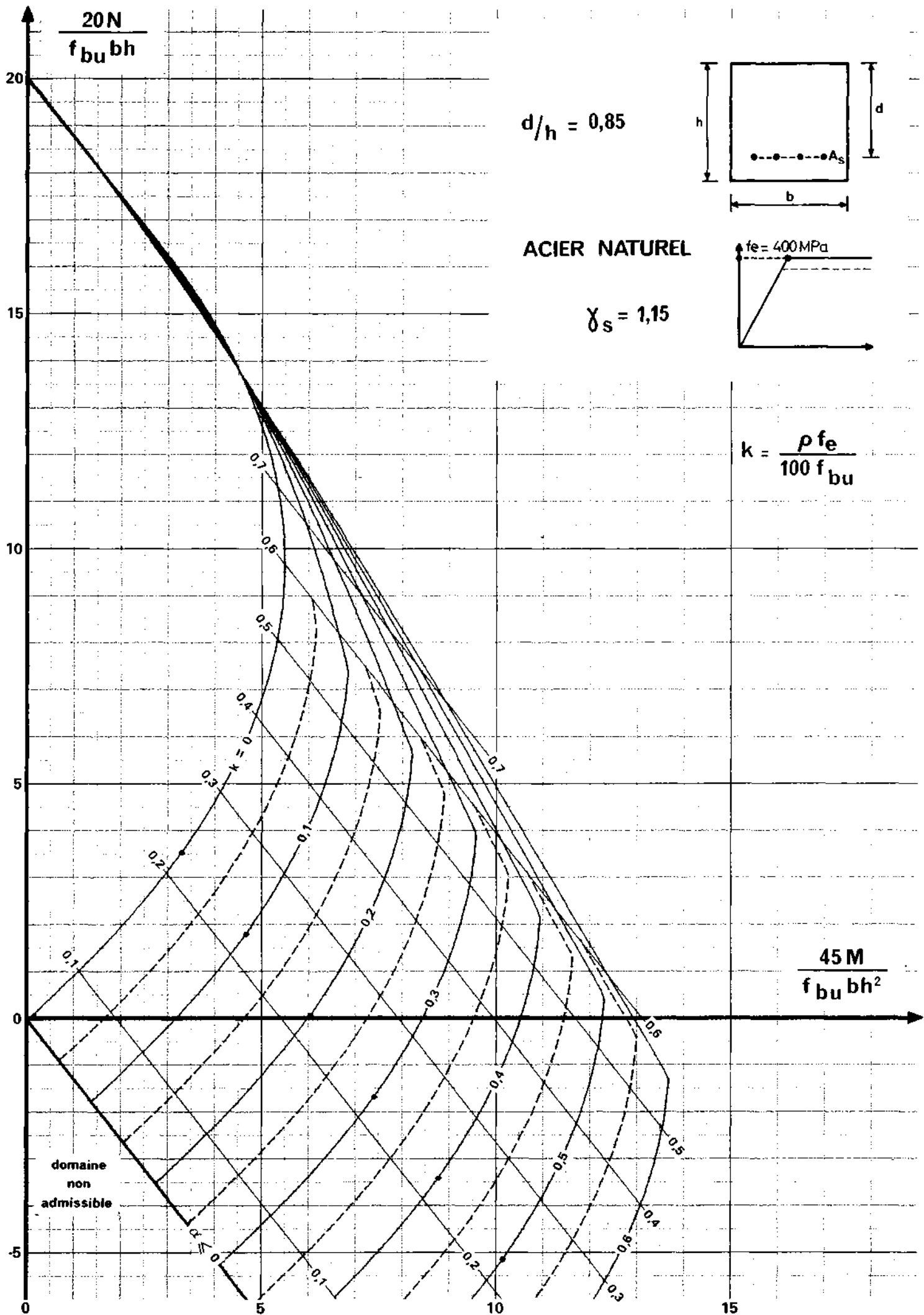


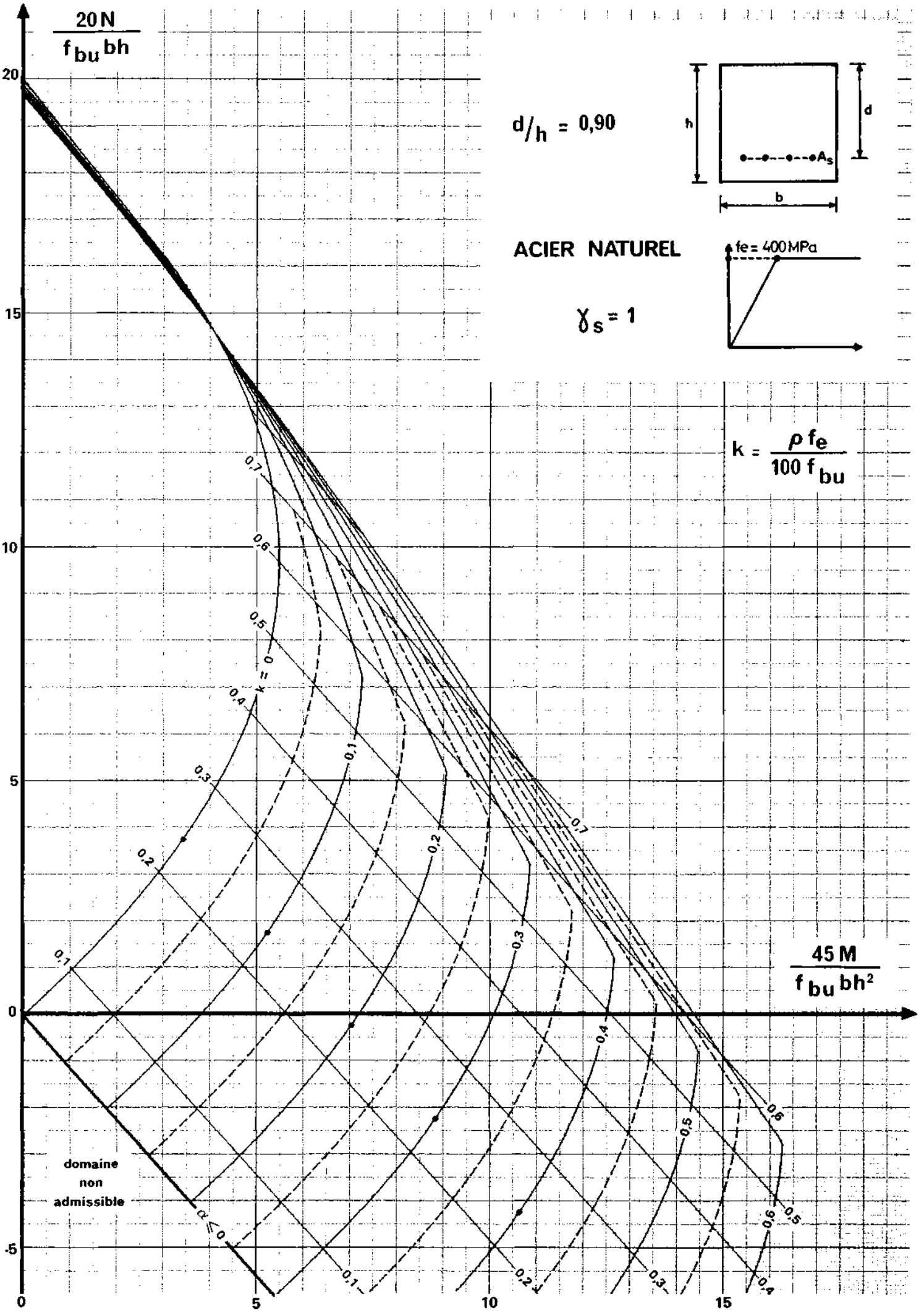
ACIER NATUREL

$\gamma_s = 1$



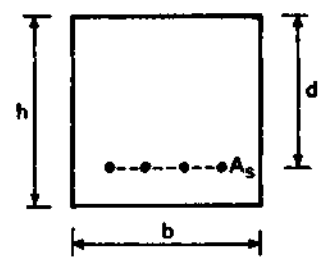
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$





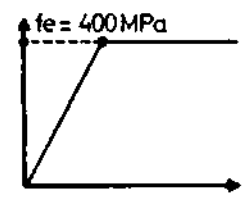
$$\frac{20N}{f_{bu}bh}$$

$$d/h = 0,90$$



ACIER NATUREL

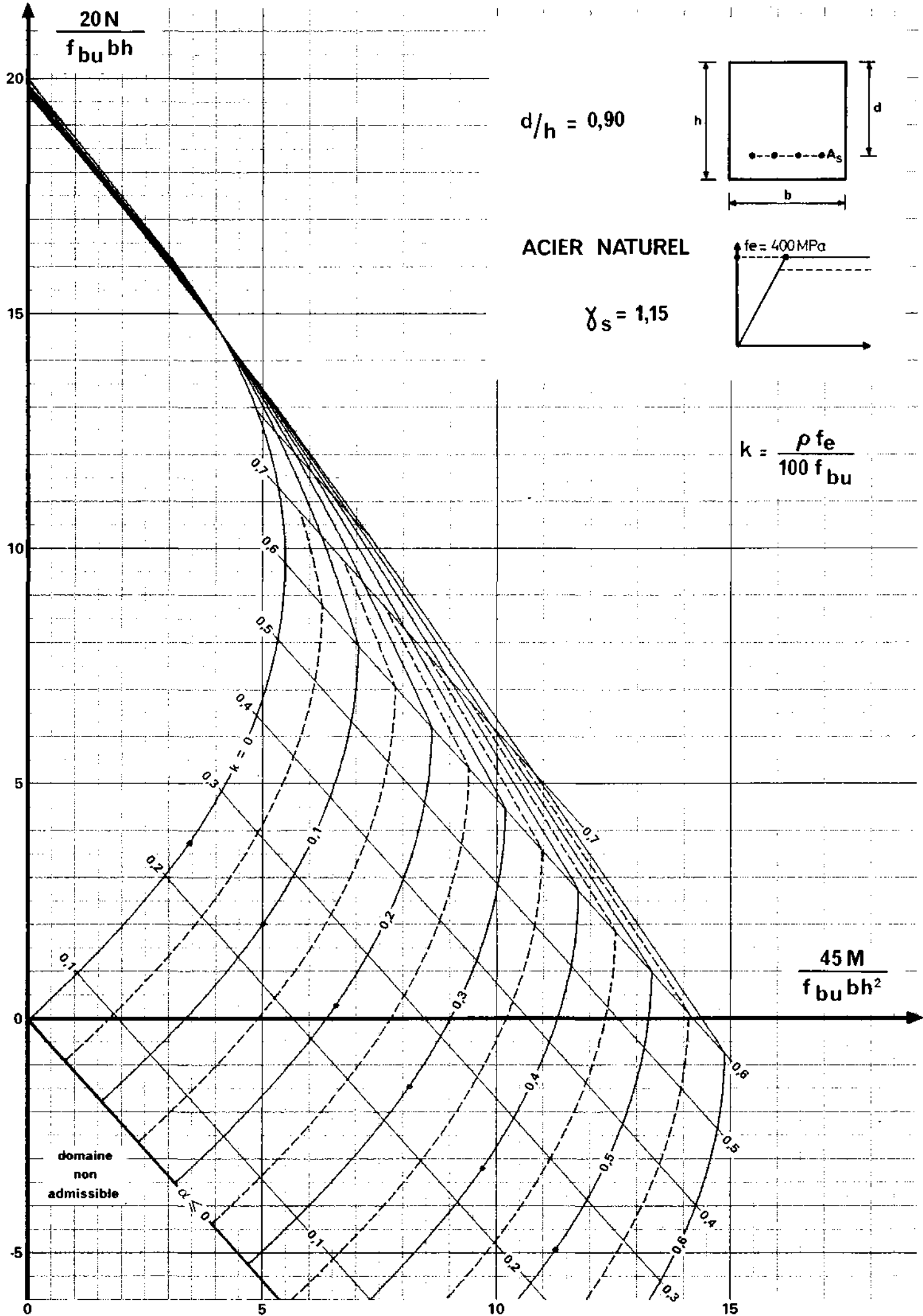
$$\gamma_s = 1$$



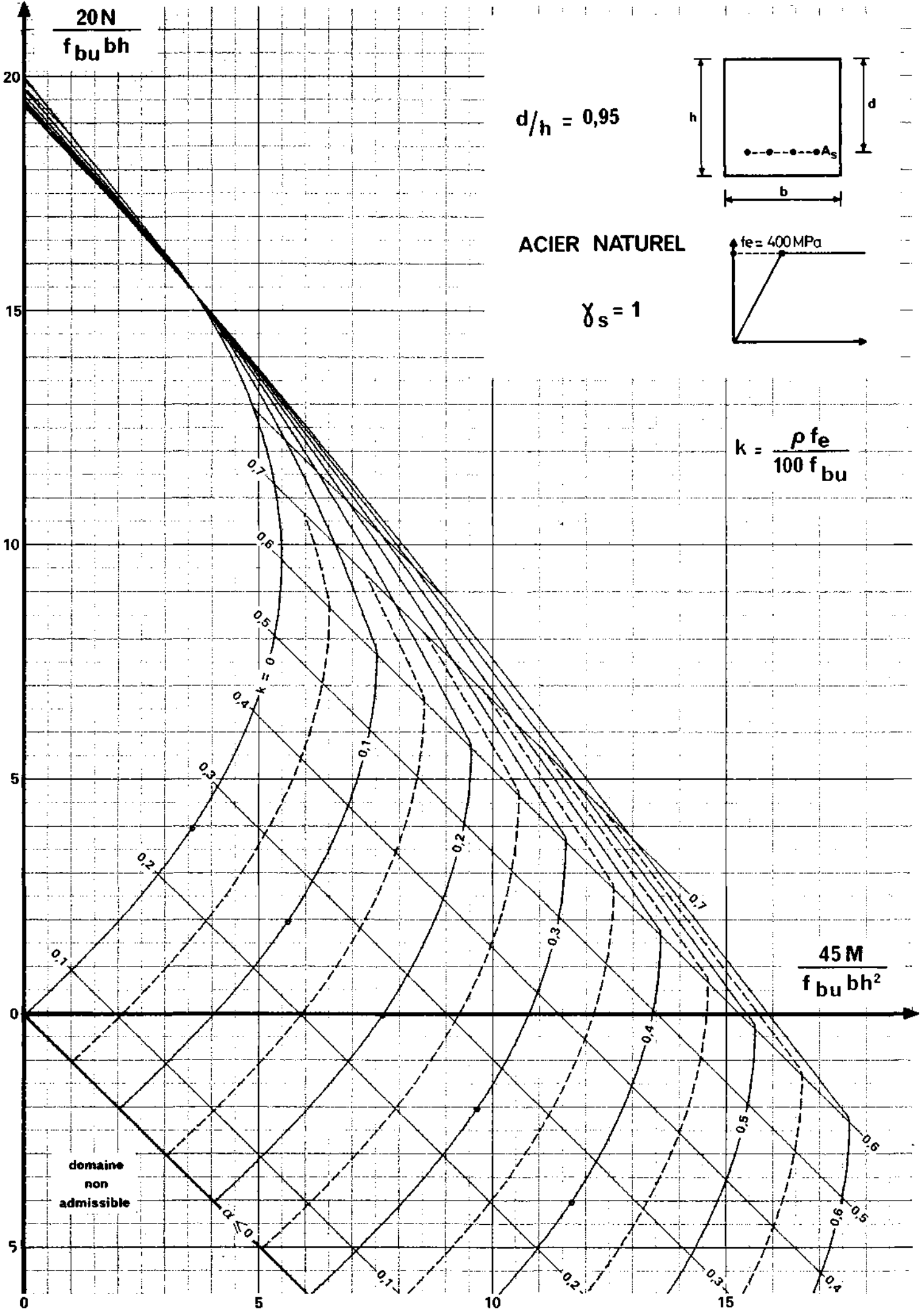
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

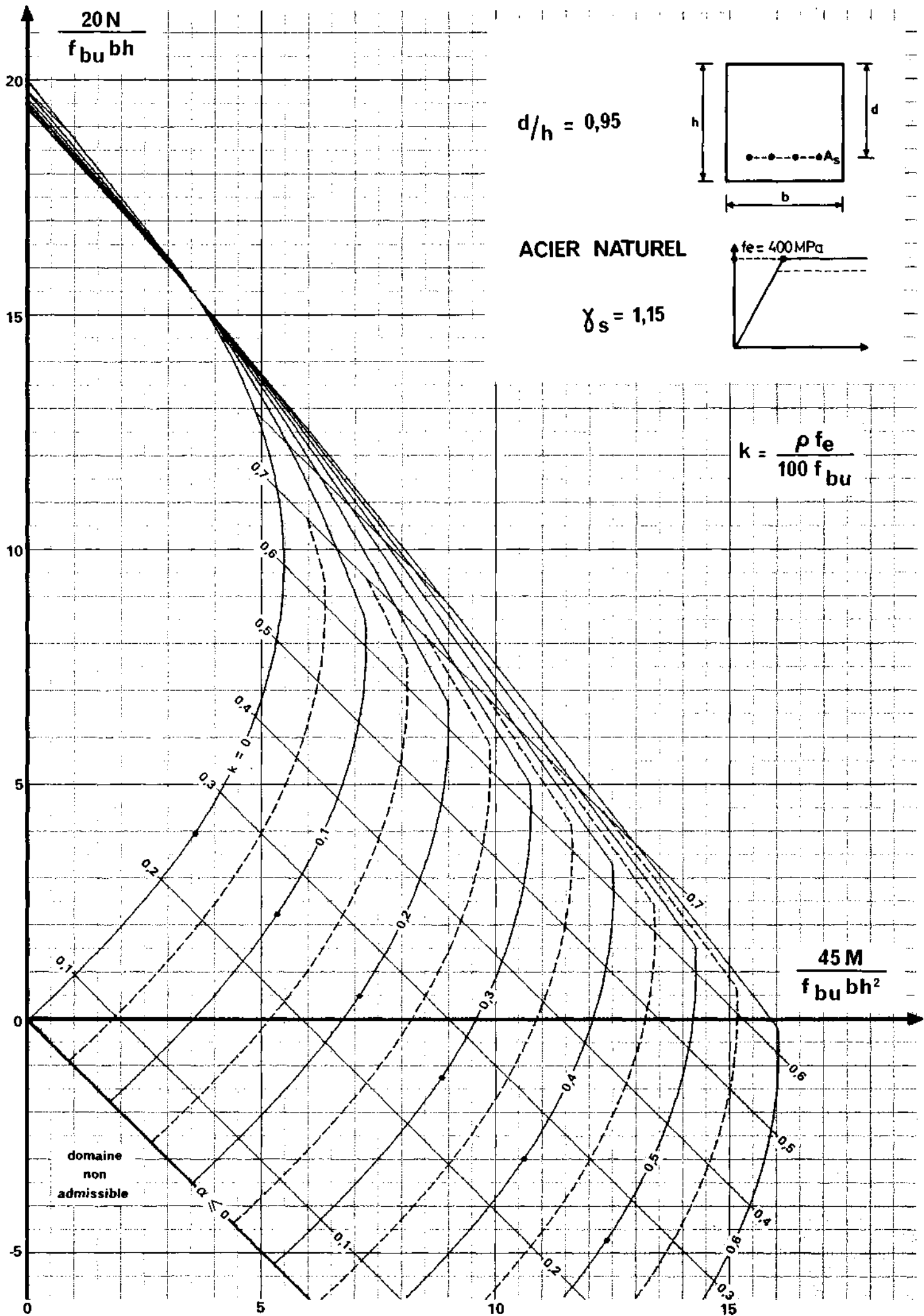
domaine non admissible

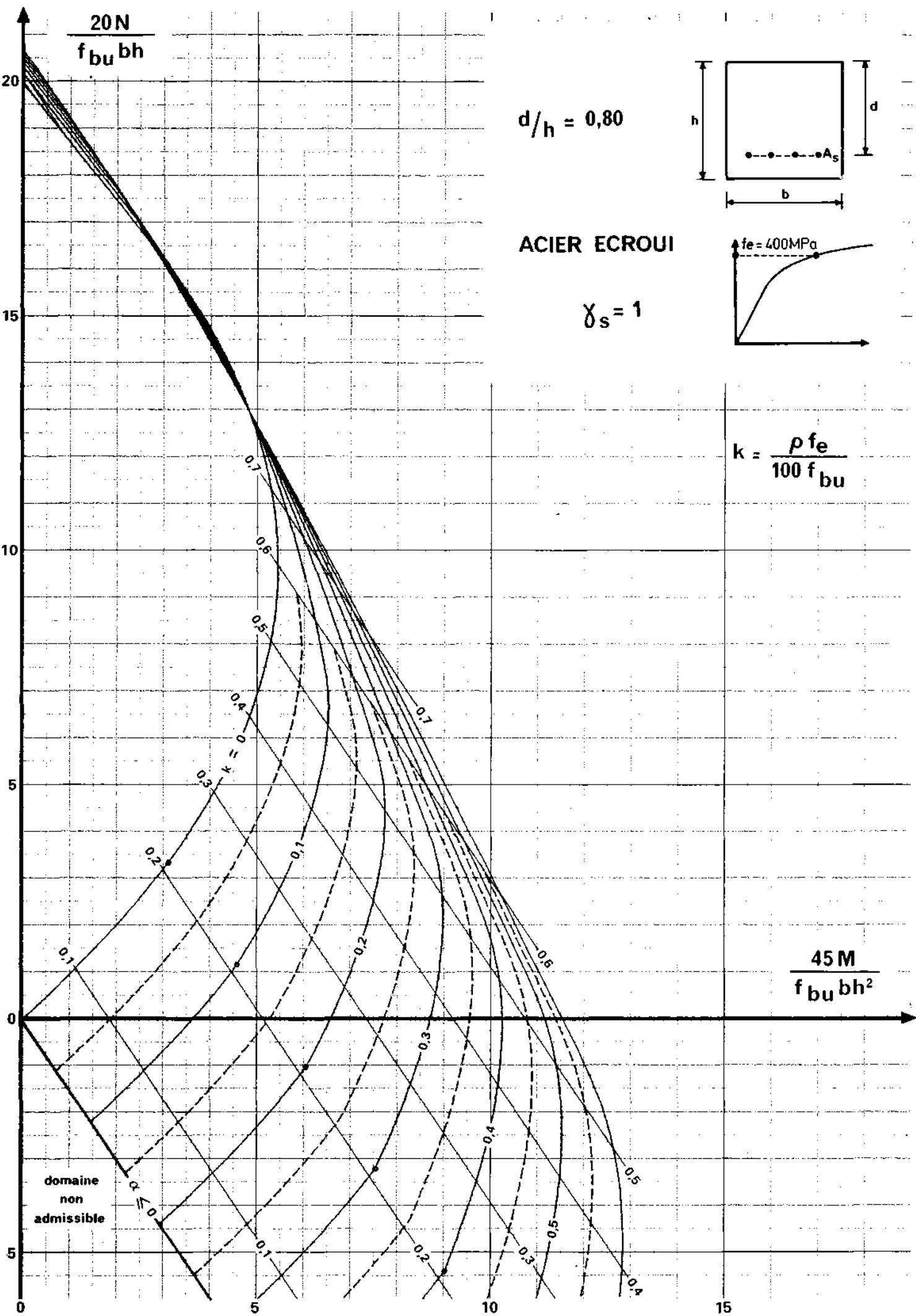
$$\frac{45M}{f_{bu}bh^2}$$





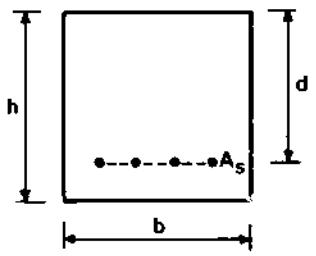






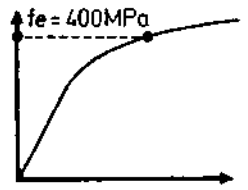
$$\frac{20N}{f_{bu}bh}$$

$$d/h = 0,80$$



ACIER ECROUI

$$\gamma_s = 1$$

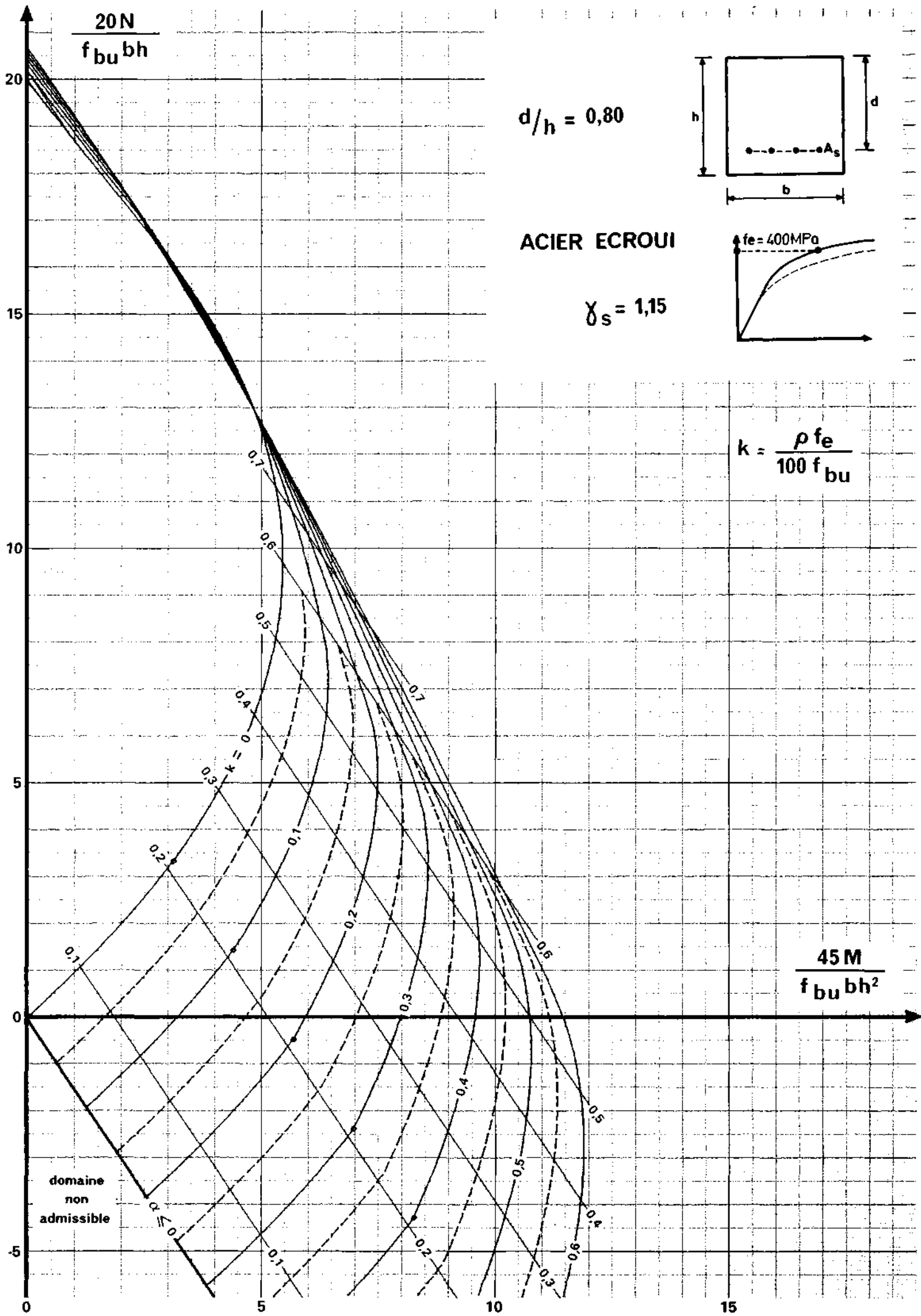


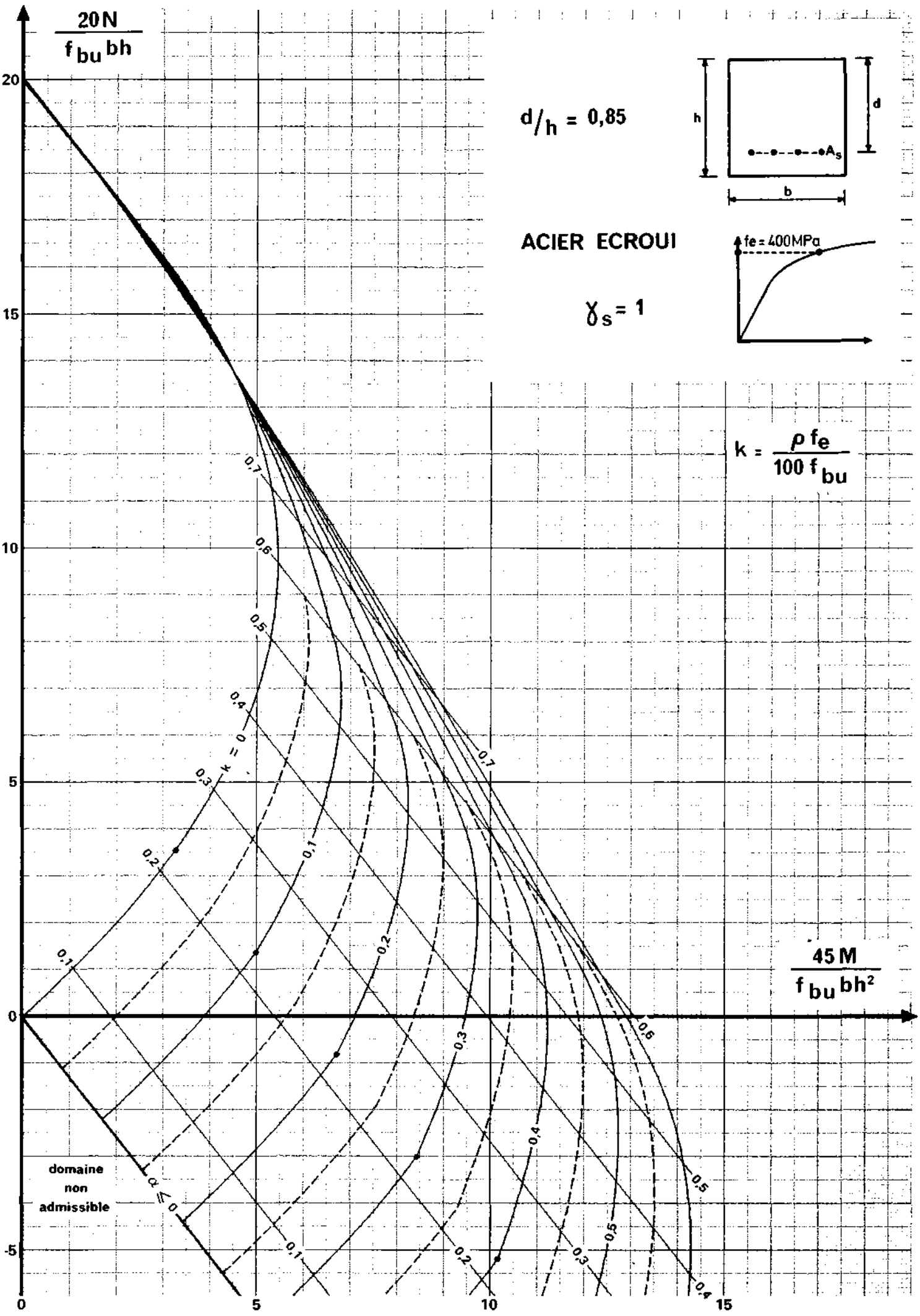
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

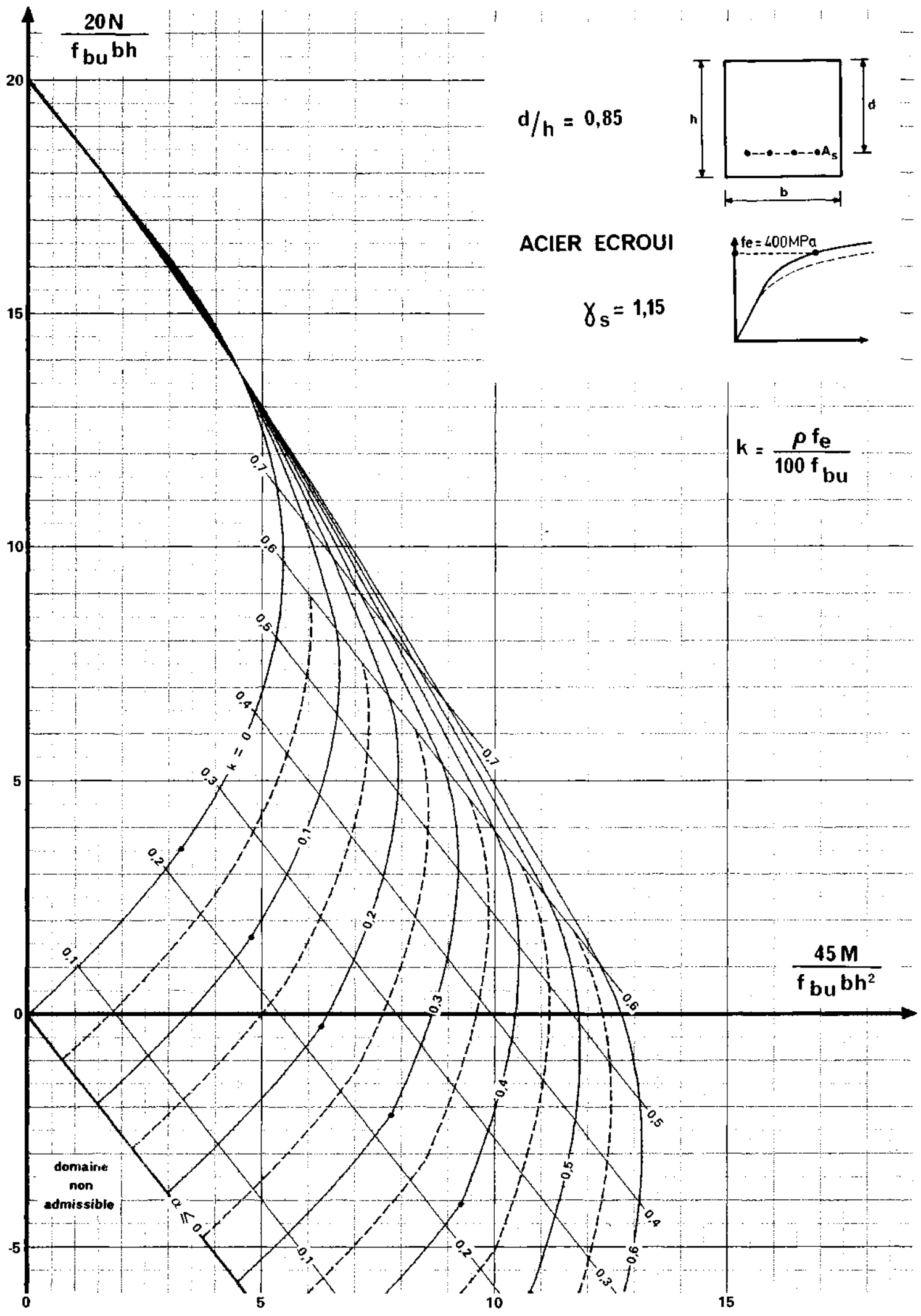
$$\frac{45M}{f_{bu}bh^2}$$

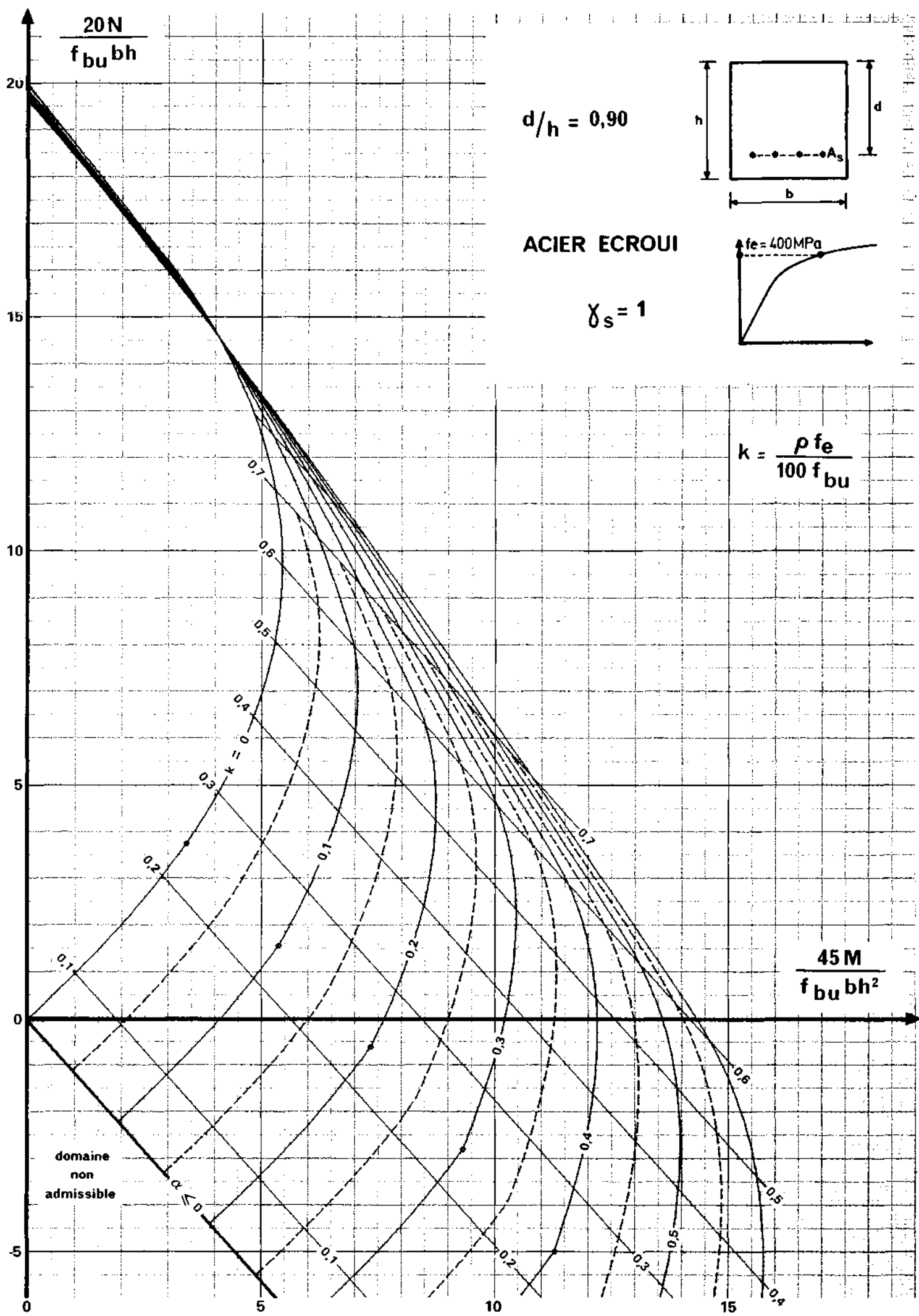
domaine non admissible

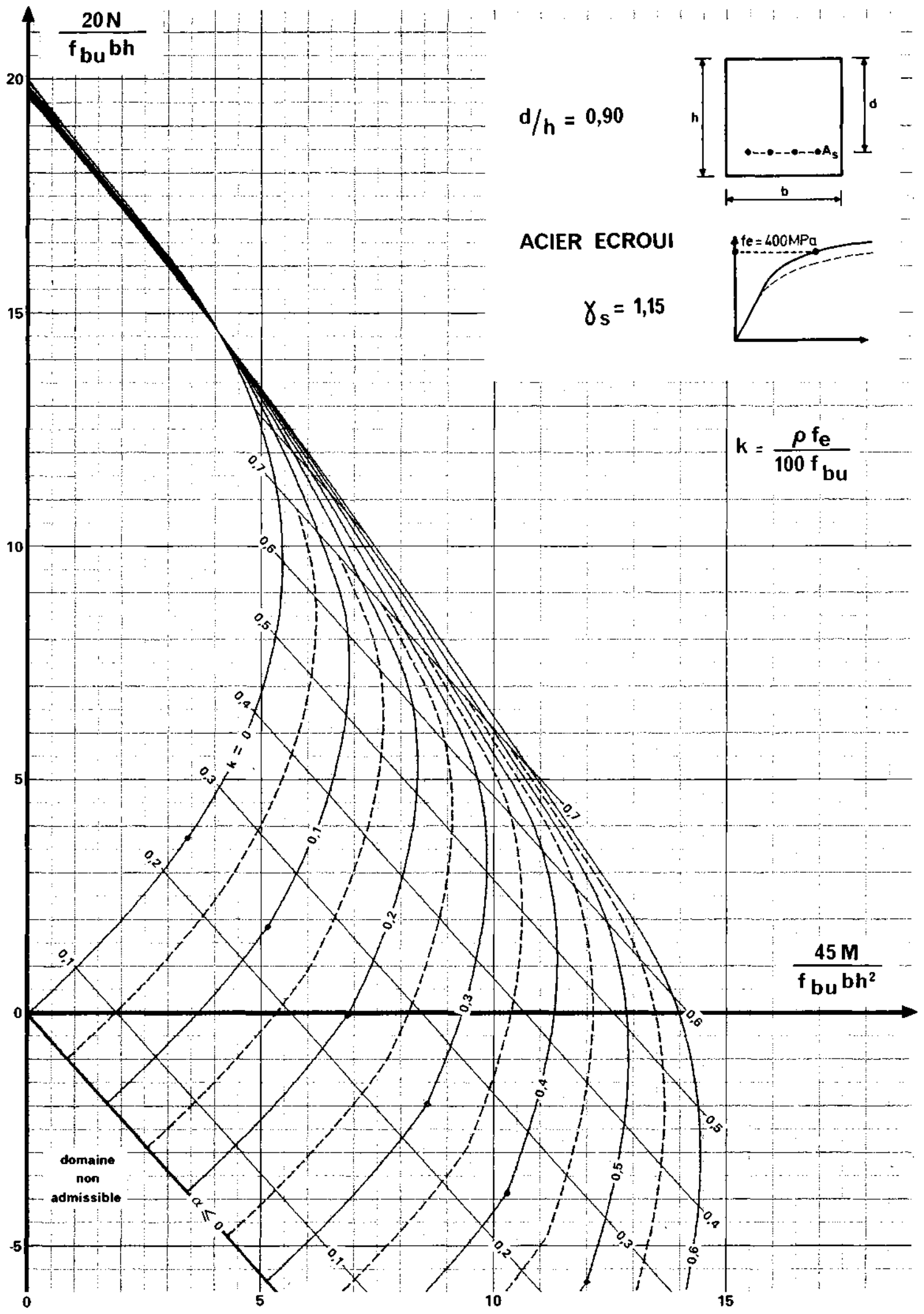
$$\alpha \leq 0$$





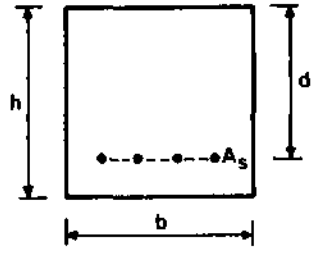






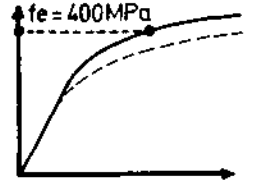
$$\frac{20N}{f_{bu}bh}$$

$$d/h = 0,90$$



ACIER ECROUI

$$\gamma_s = 1,15$$

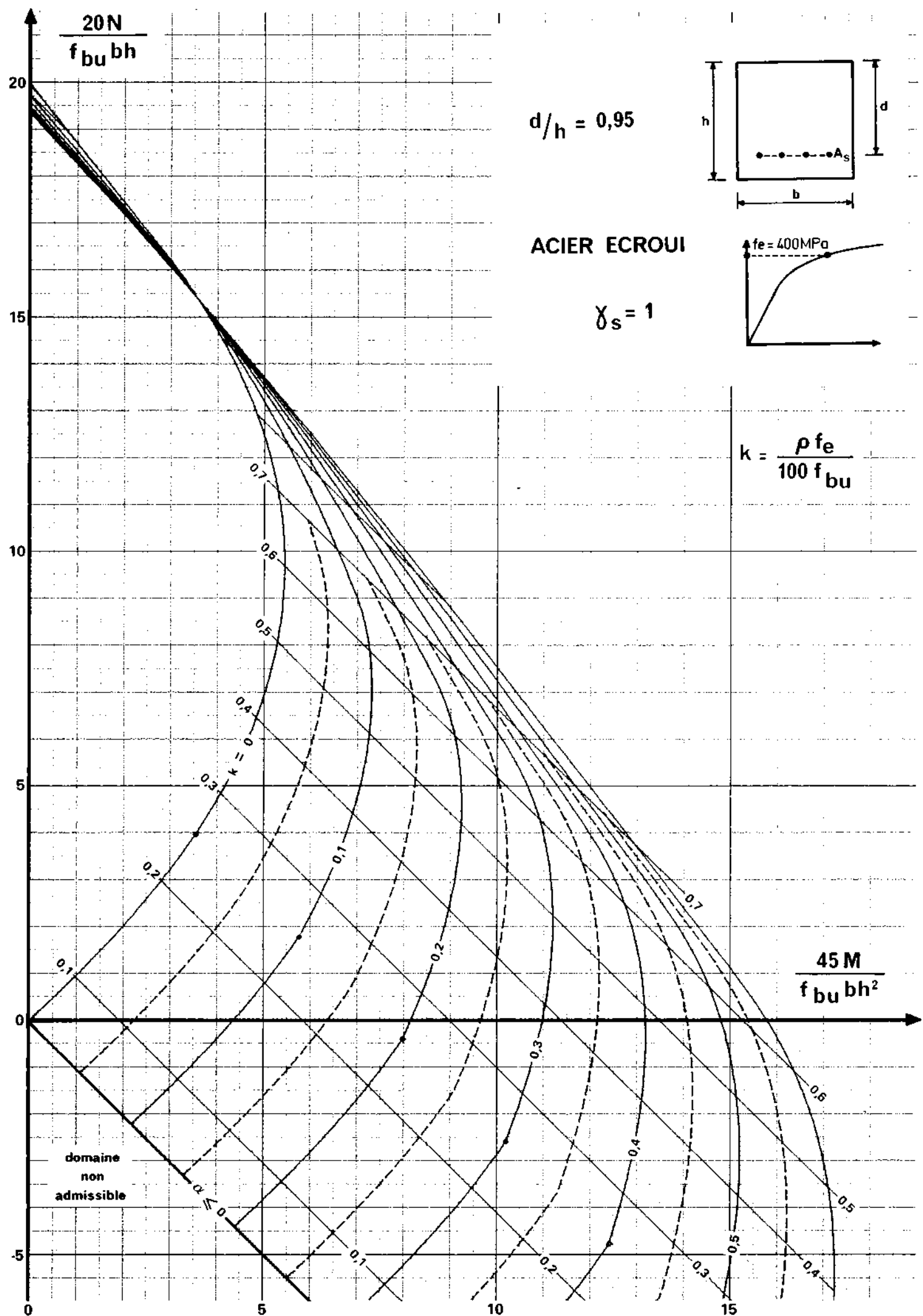


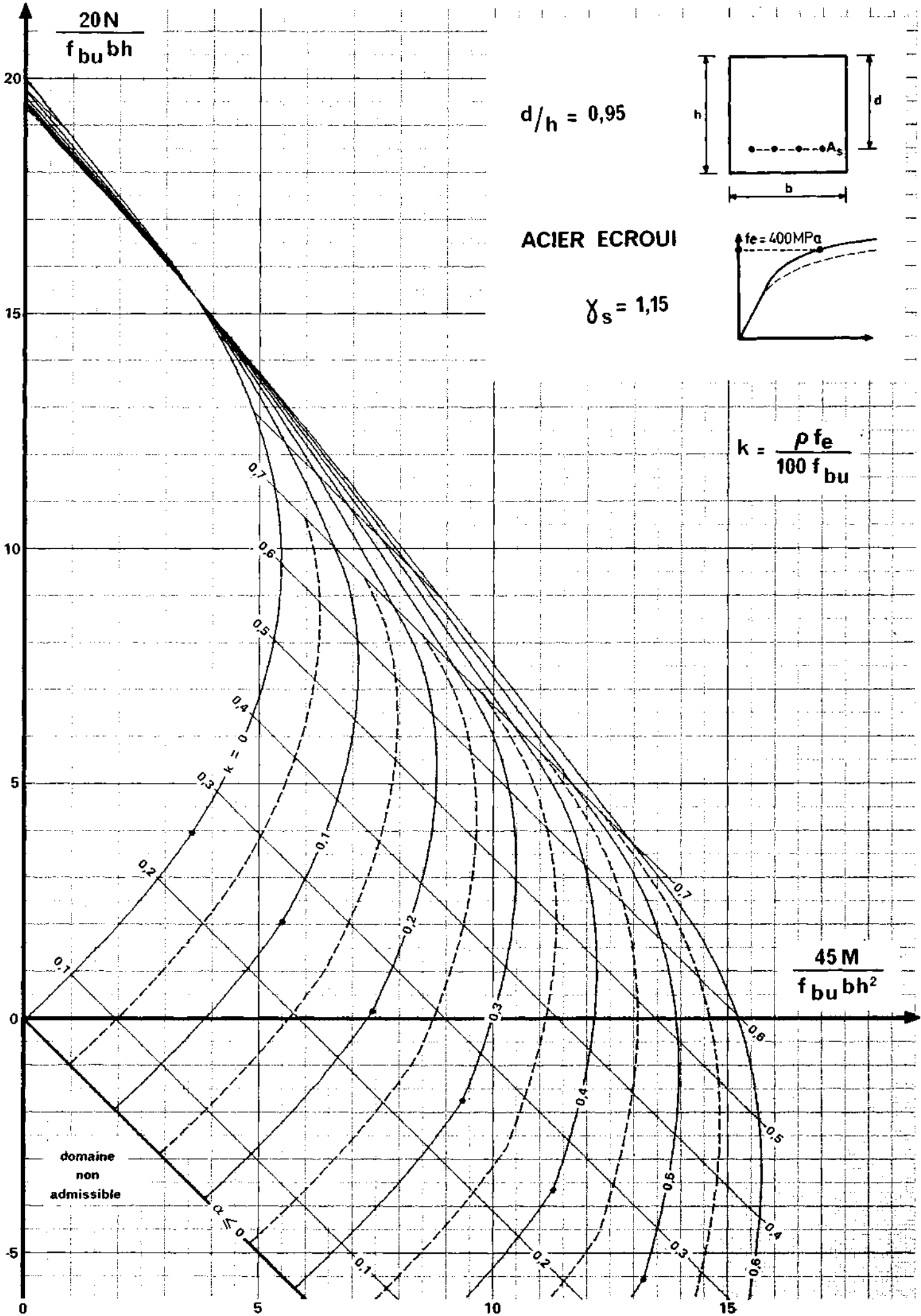
$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

domaine non admissible

$$\frac{45M}{f_{bu}bh^2}$$

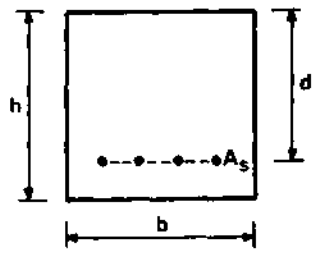






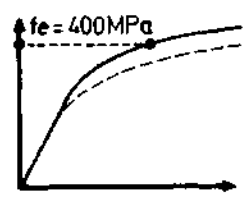
$20N$   
 $f_{bu} bh$

$d/h = 0,95$



ACIER ECROUI

$\gamma_s = 1,15$



$$k = \frac{\rho f_e}{100 f_{bu}}$$

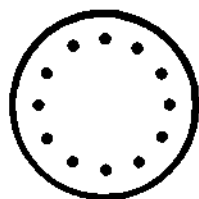
domaine non admissible

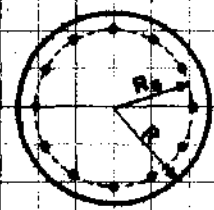
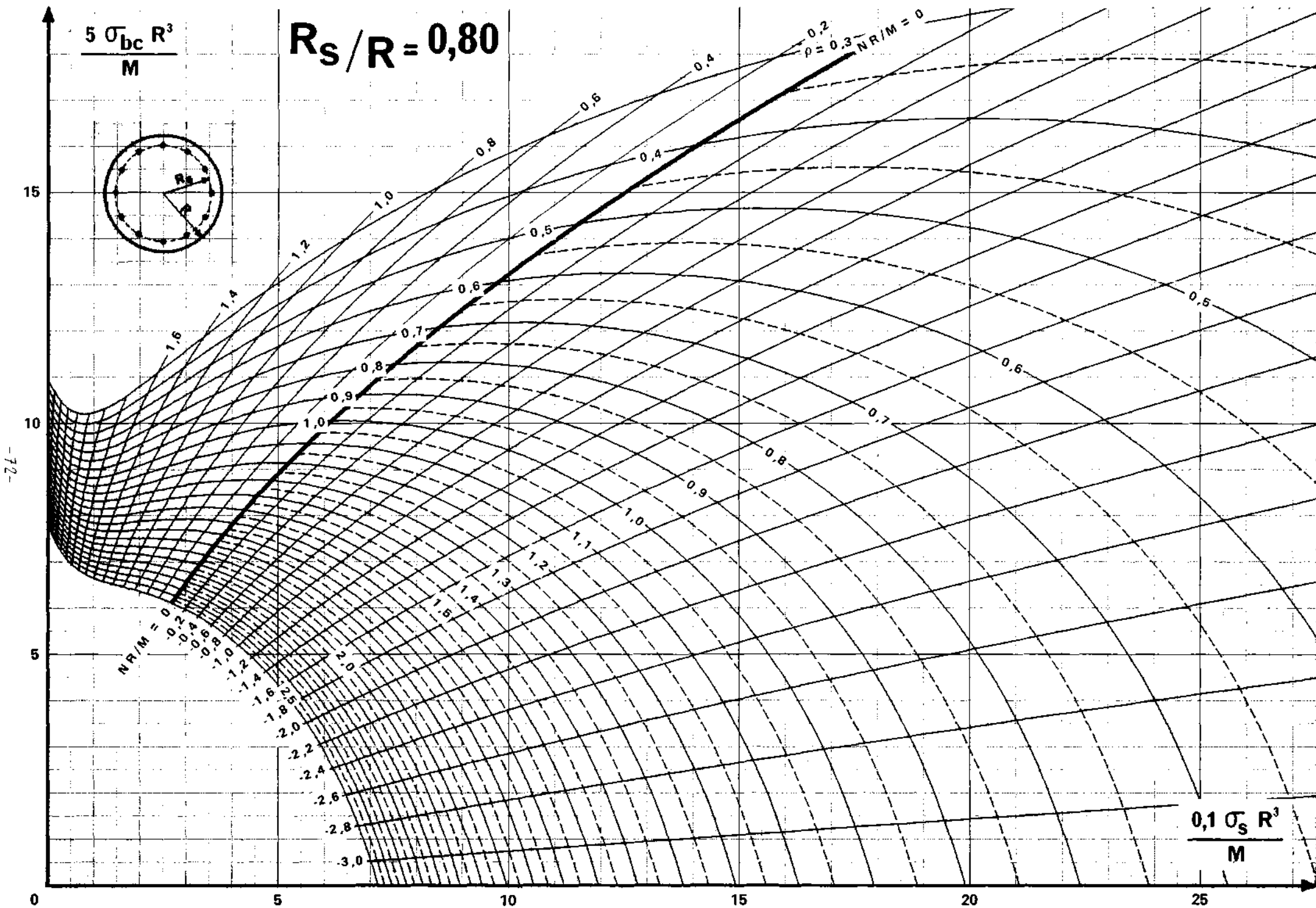
$\alpha \leq 0$

$45M$   
 $f_{bu} bh^2$

# ***ETAT-LIMITE DE SERVICE***

Section circulaire





-12-



$$\frac{5 \sigma_{bc} R^3}{M}$$

$$R_s/R = 0,85$$

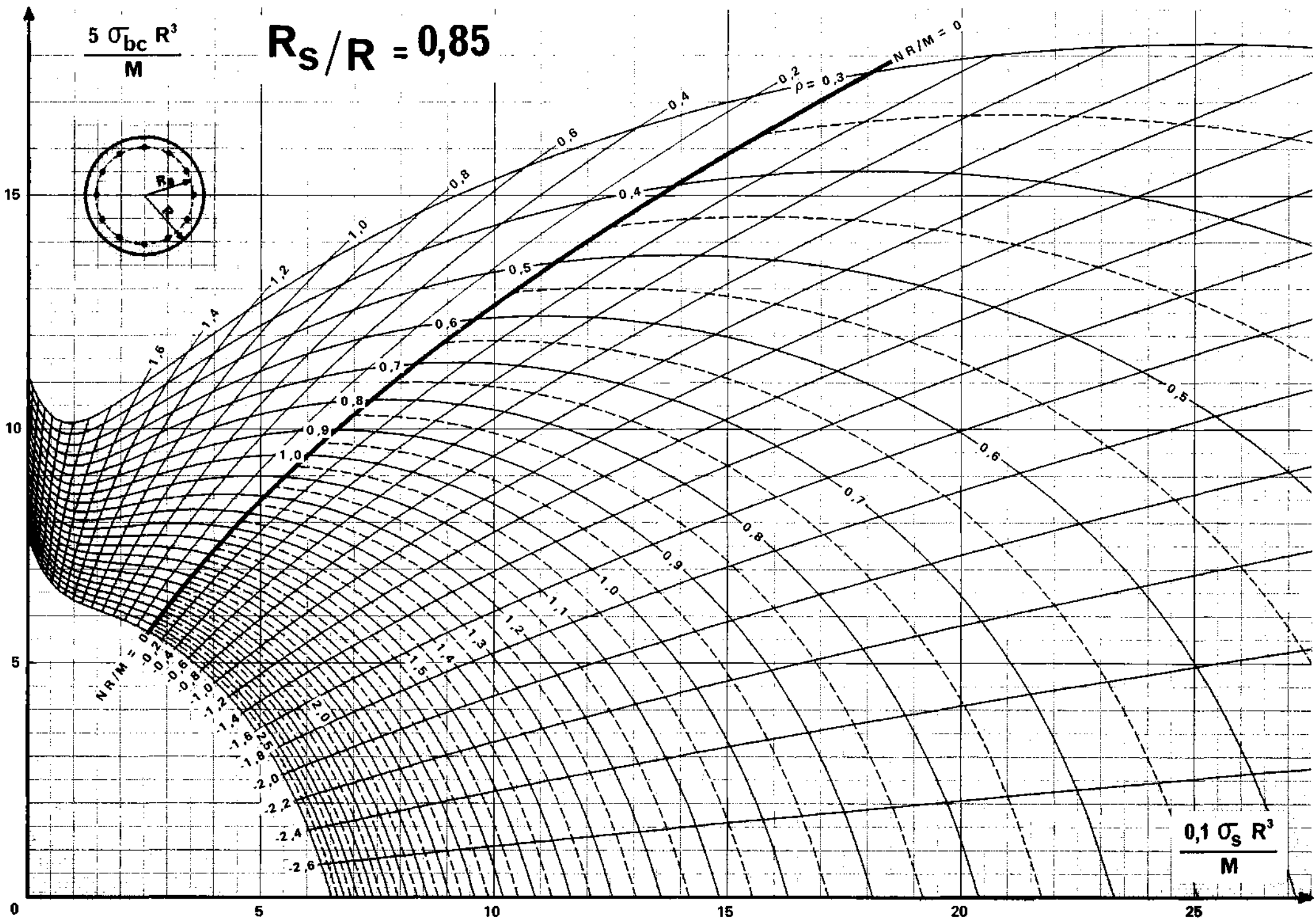
$$NR/M = 0$$

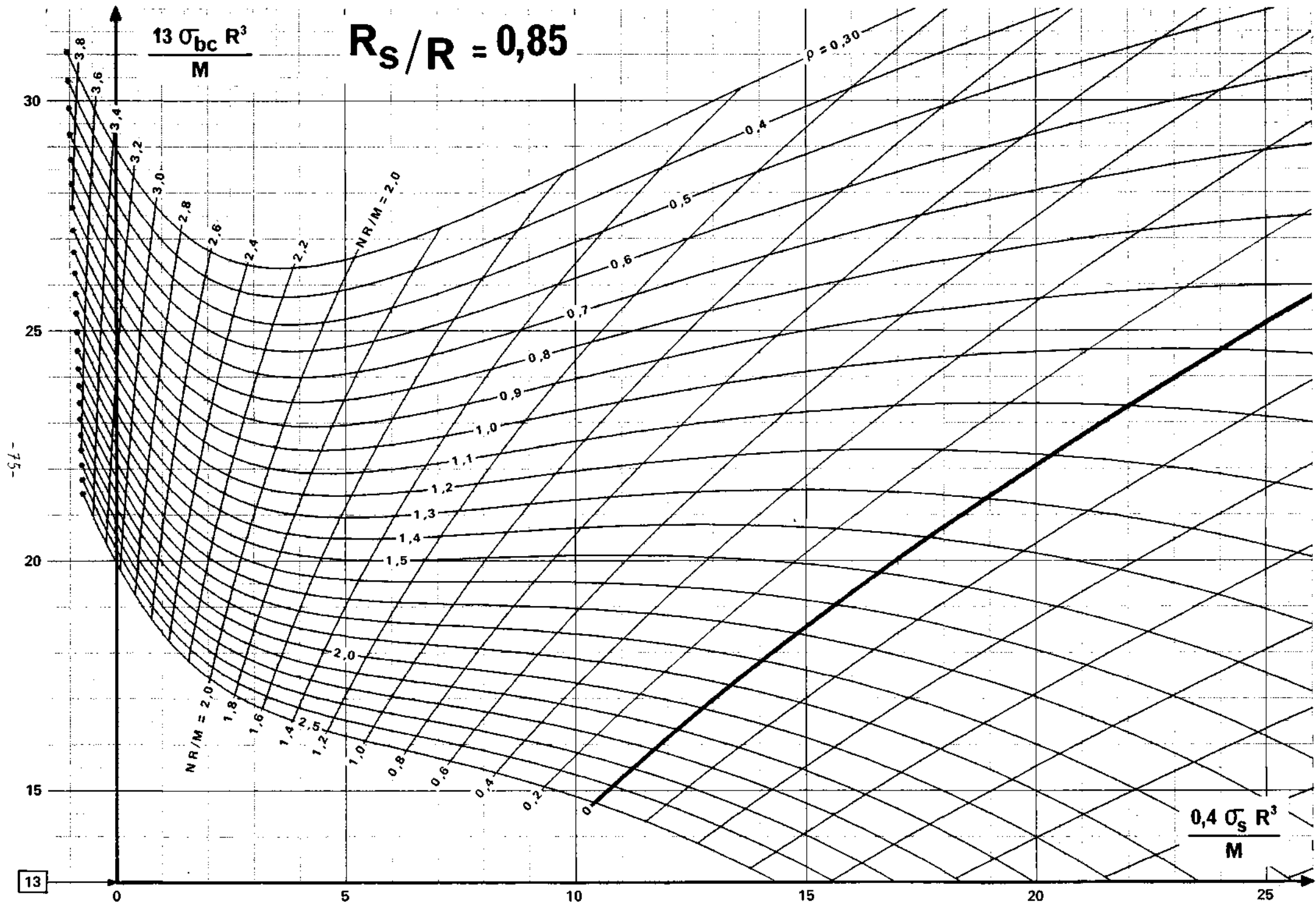
$$\rho = 0,3$$

$$\frac{0,1 \sigma_s R^3}{M}$$



-74-

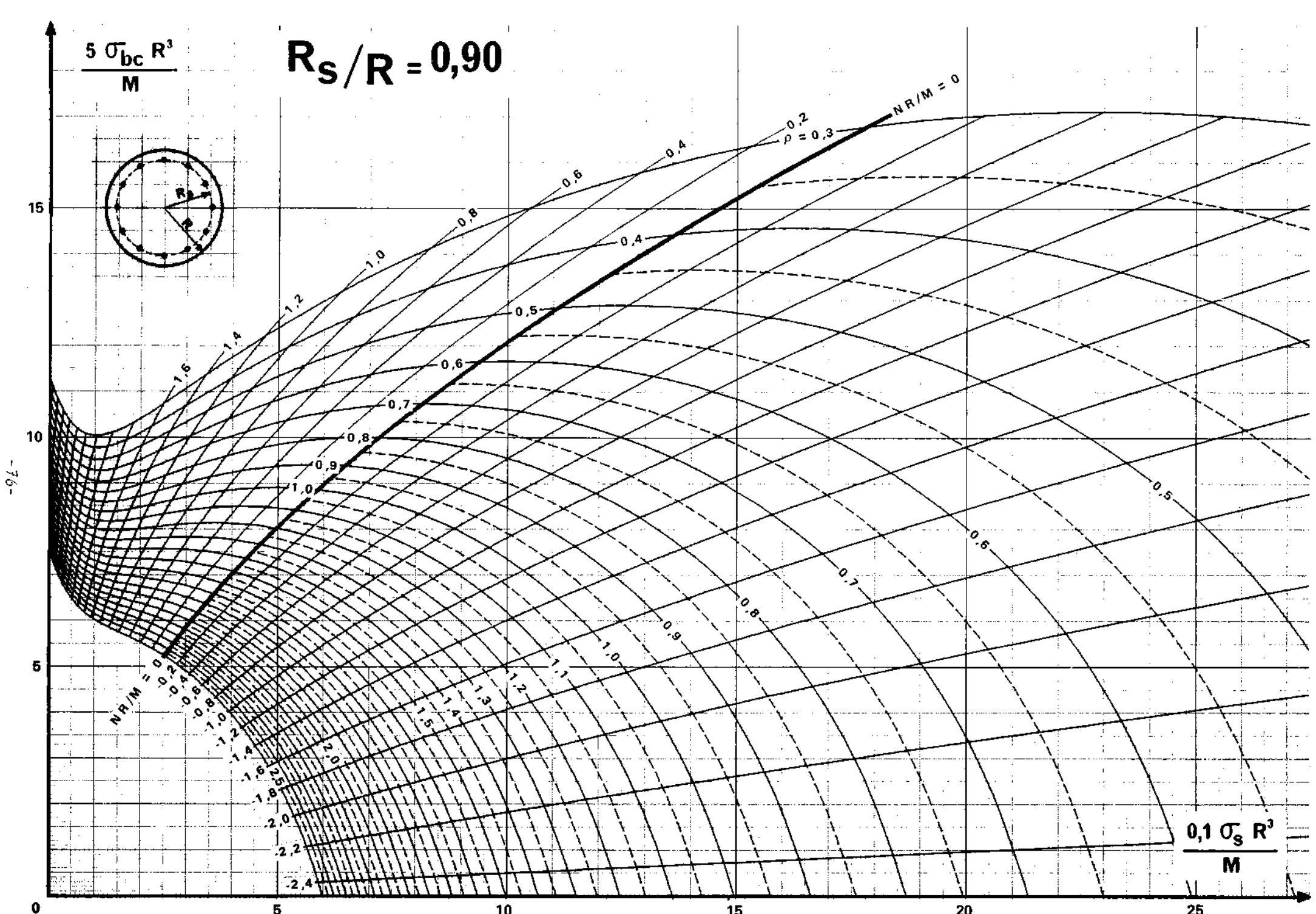




$$\frac{5 \sigma_{bc} R^3}{M}$$

$R_s/R = 0,90$

$$\frac{0,1 \sigma_s R^3}{M}$$



-76-

0

5

10

15

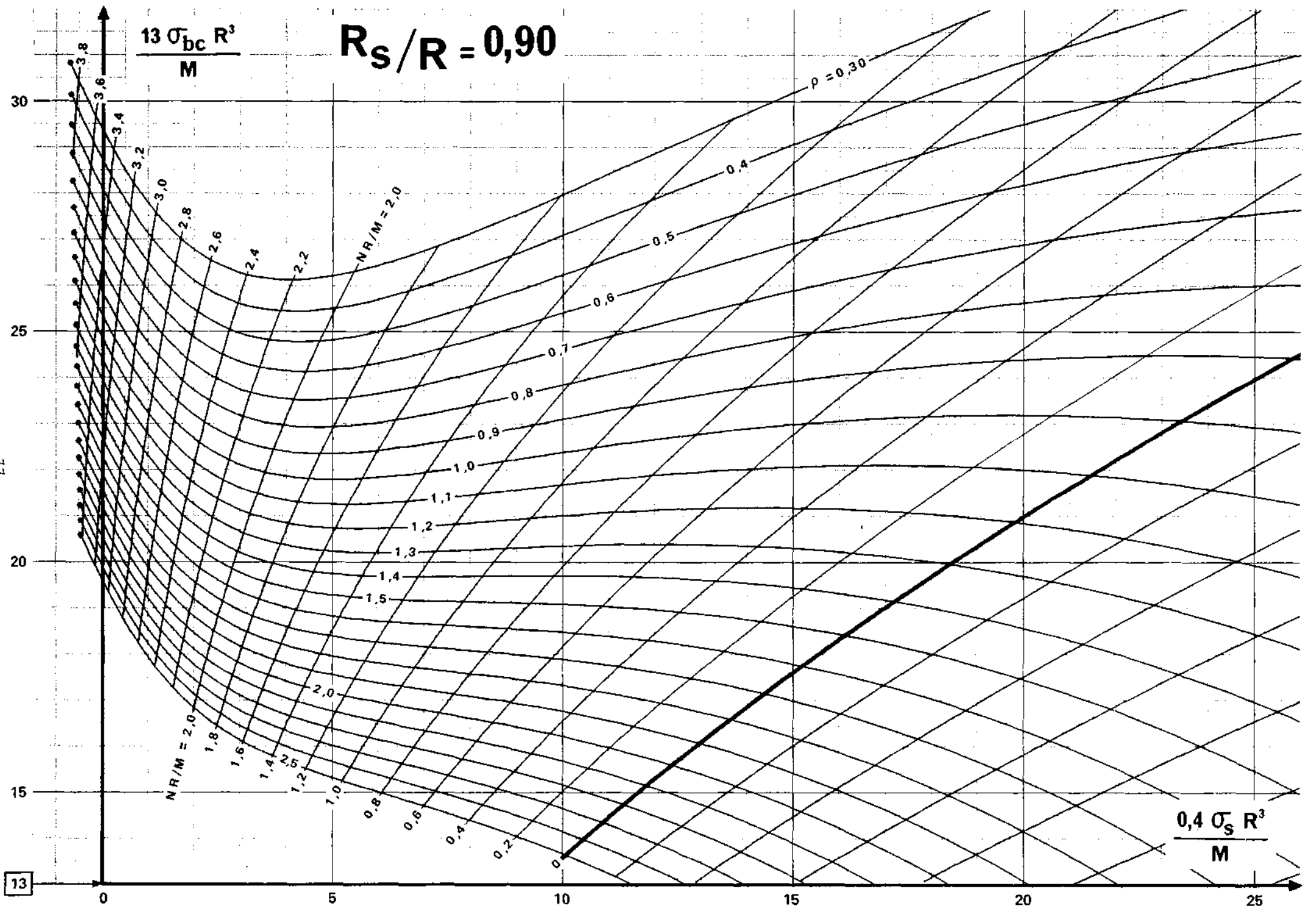
20

25



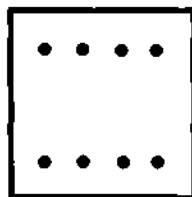
$$\frac{13 \sigma_{bc} R^3}{M}$$

$$R_s/R = 0,90$$



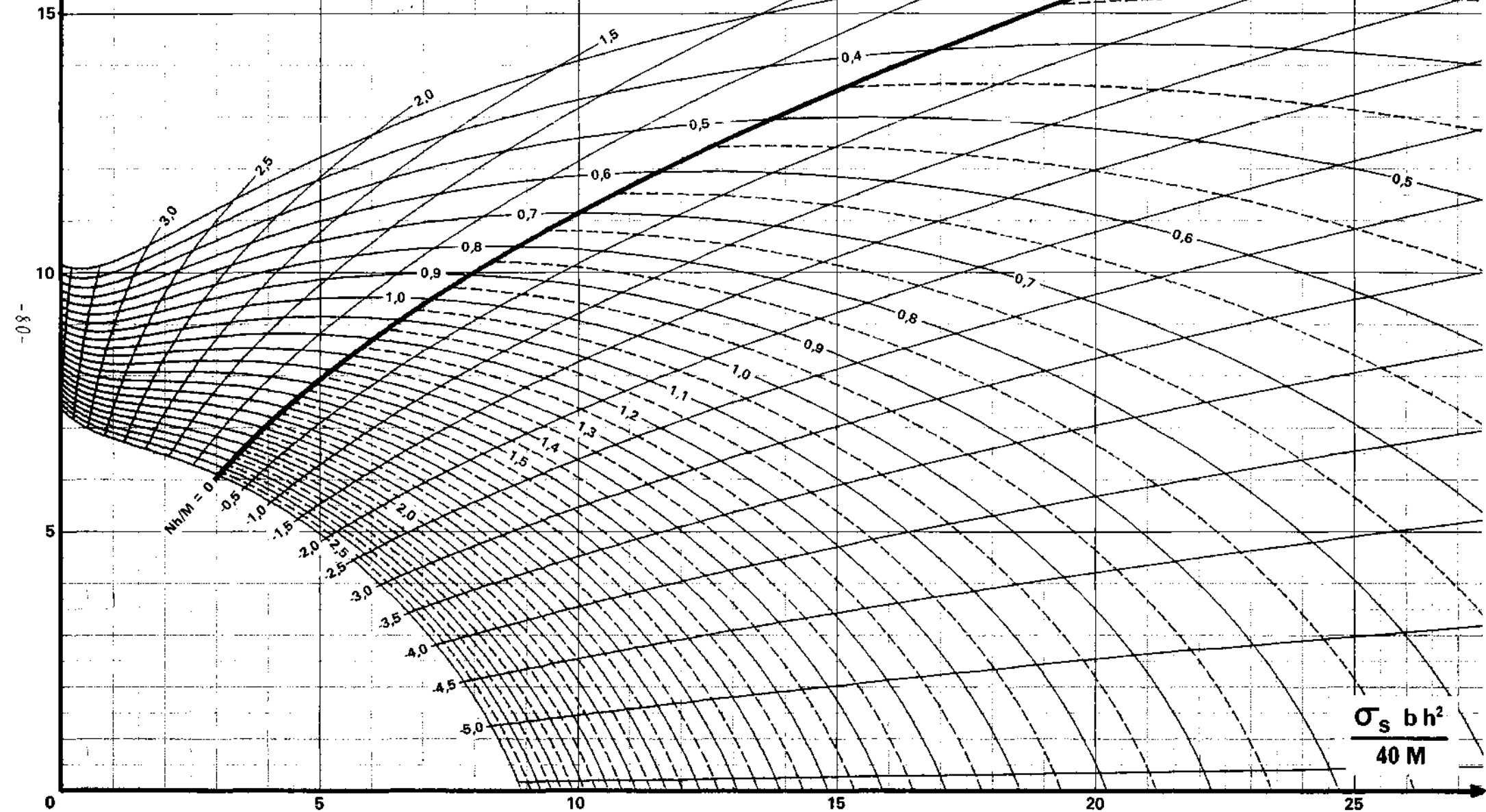
## ***ETAT-LIMITE DE SERVICE***

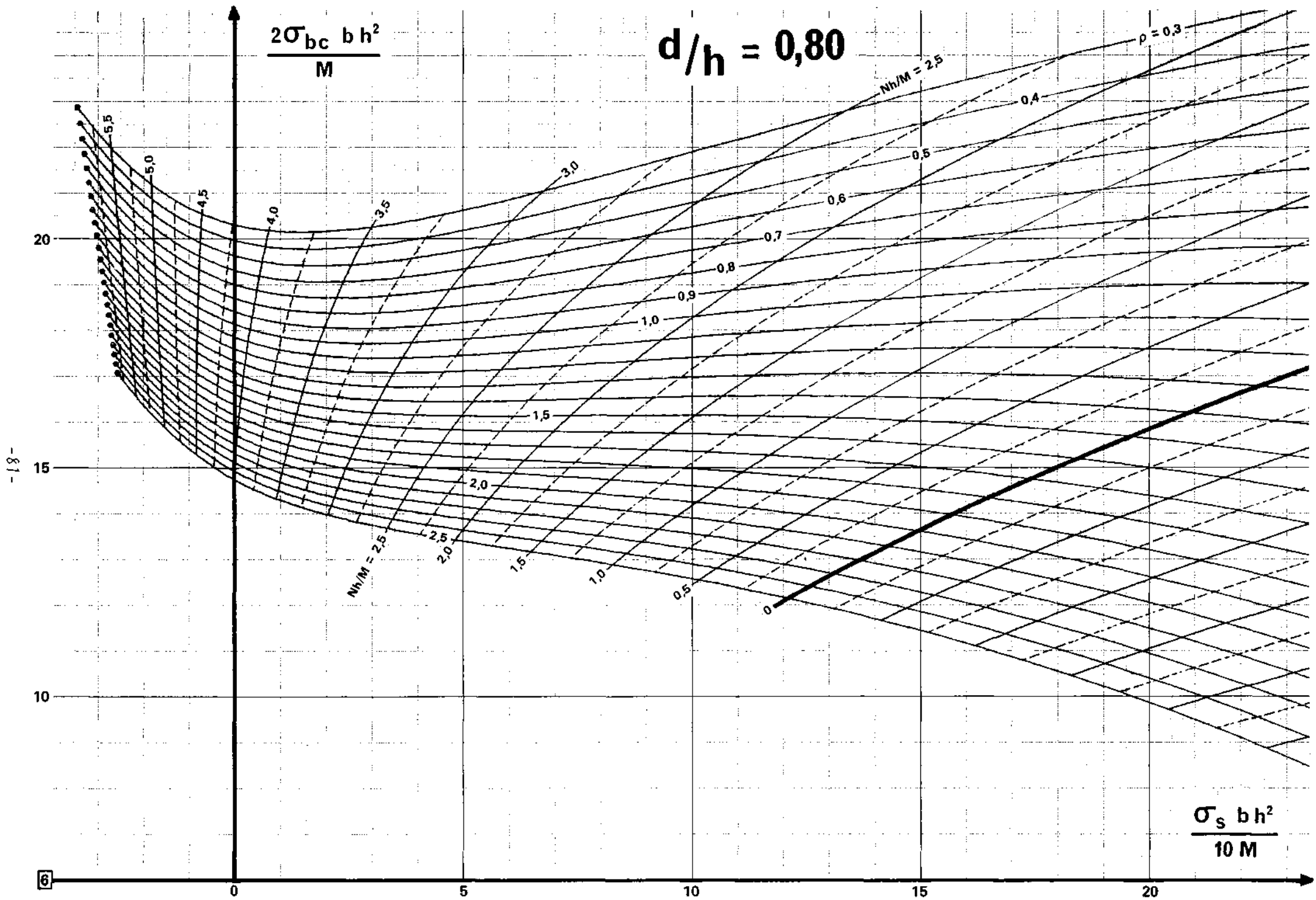
Section rectangulaire  
2 nappes d'armatures



$$\frac{\sigma_{bc} b h^2}{M}$$

$$d/h = 0,80$$



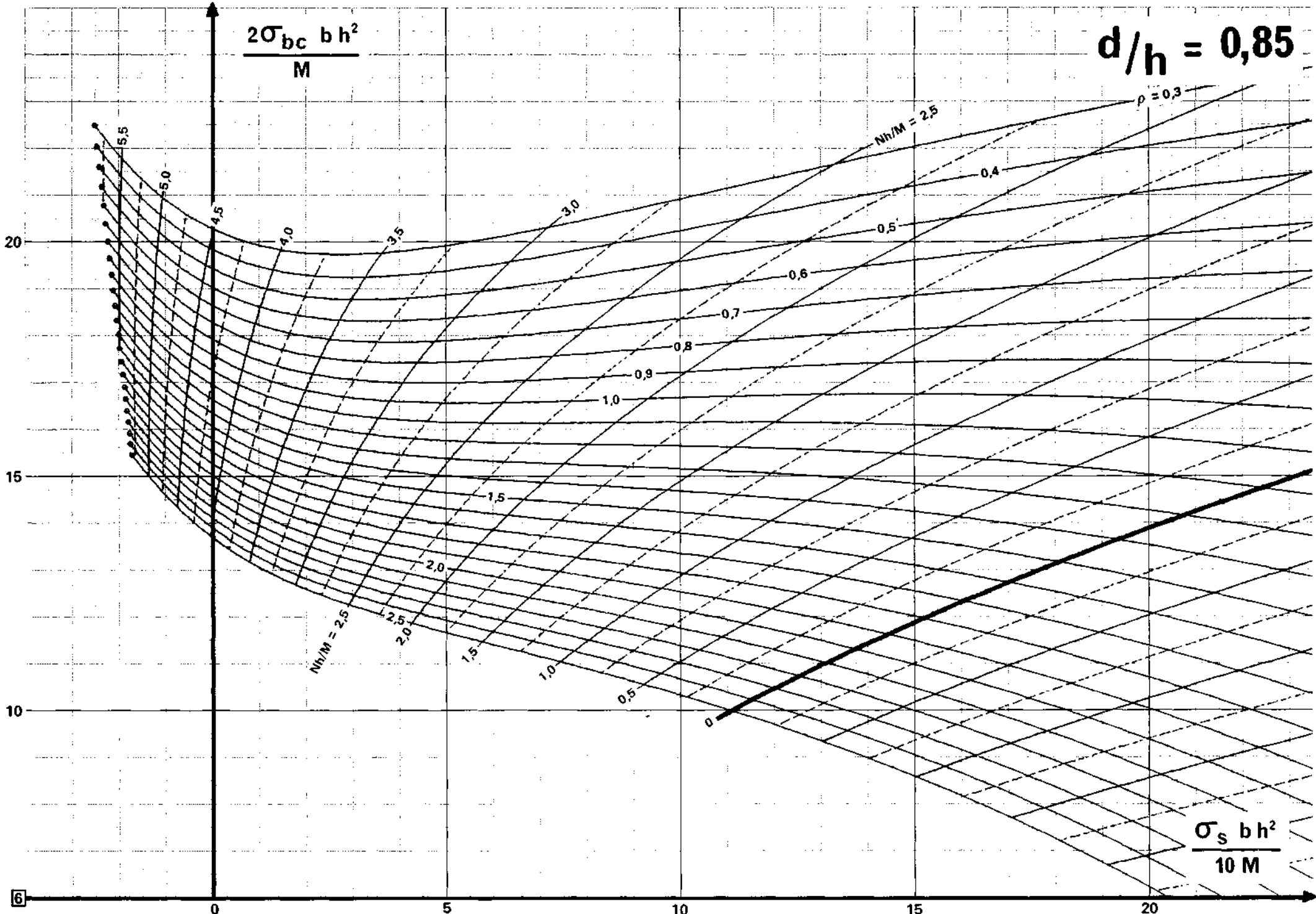




$d/h = 0,85$

$$\frac{2\sigma_{bc} b h^2}{M}$$

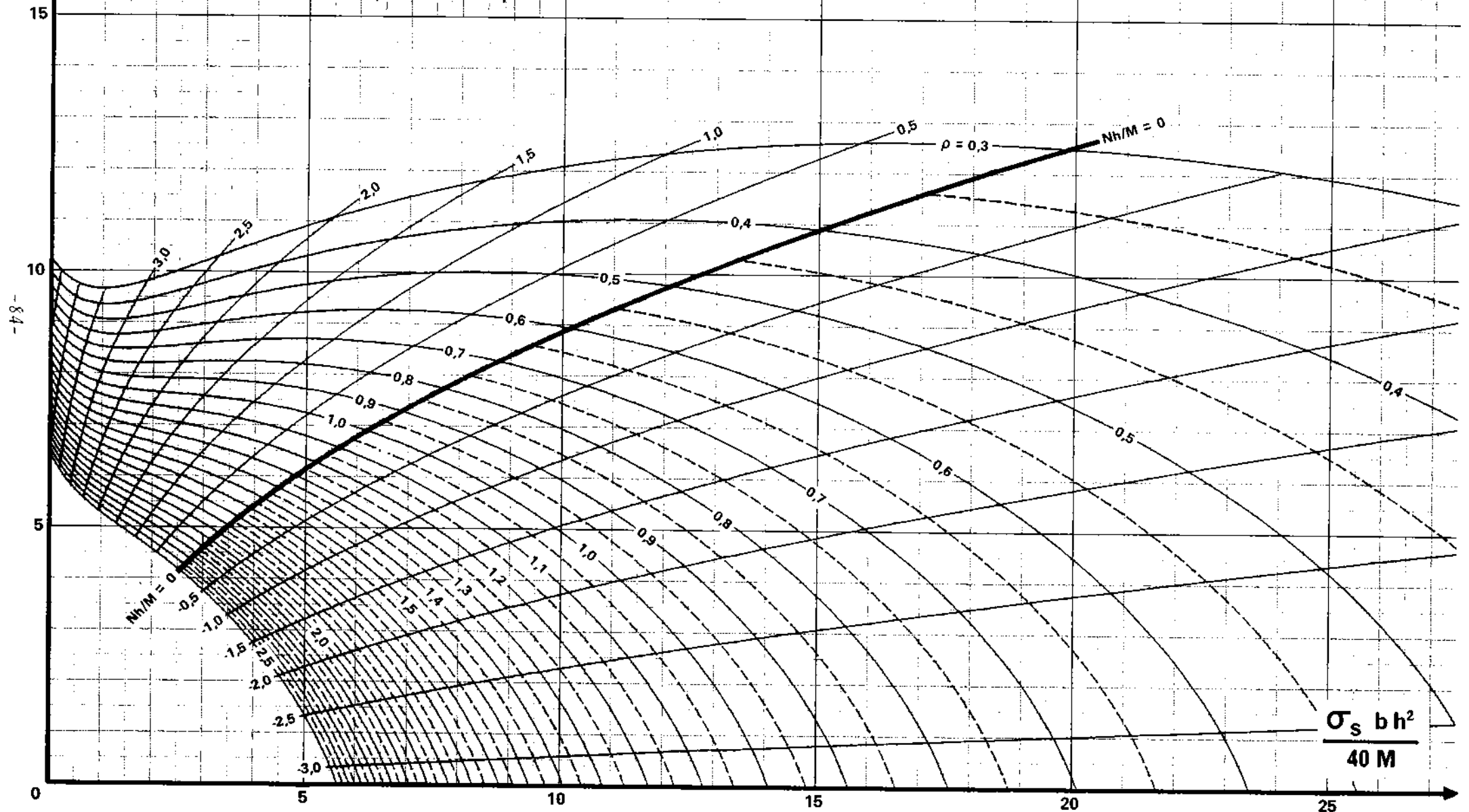
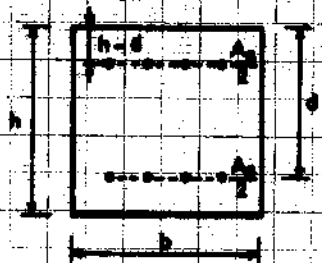
$$\frac{\sigma_s b h^2}{10 M}$$



-83-

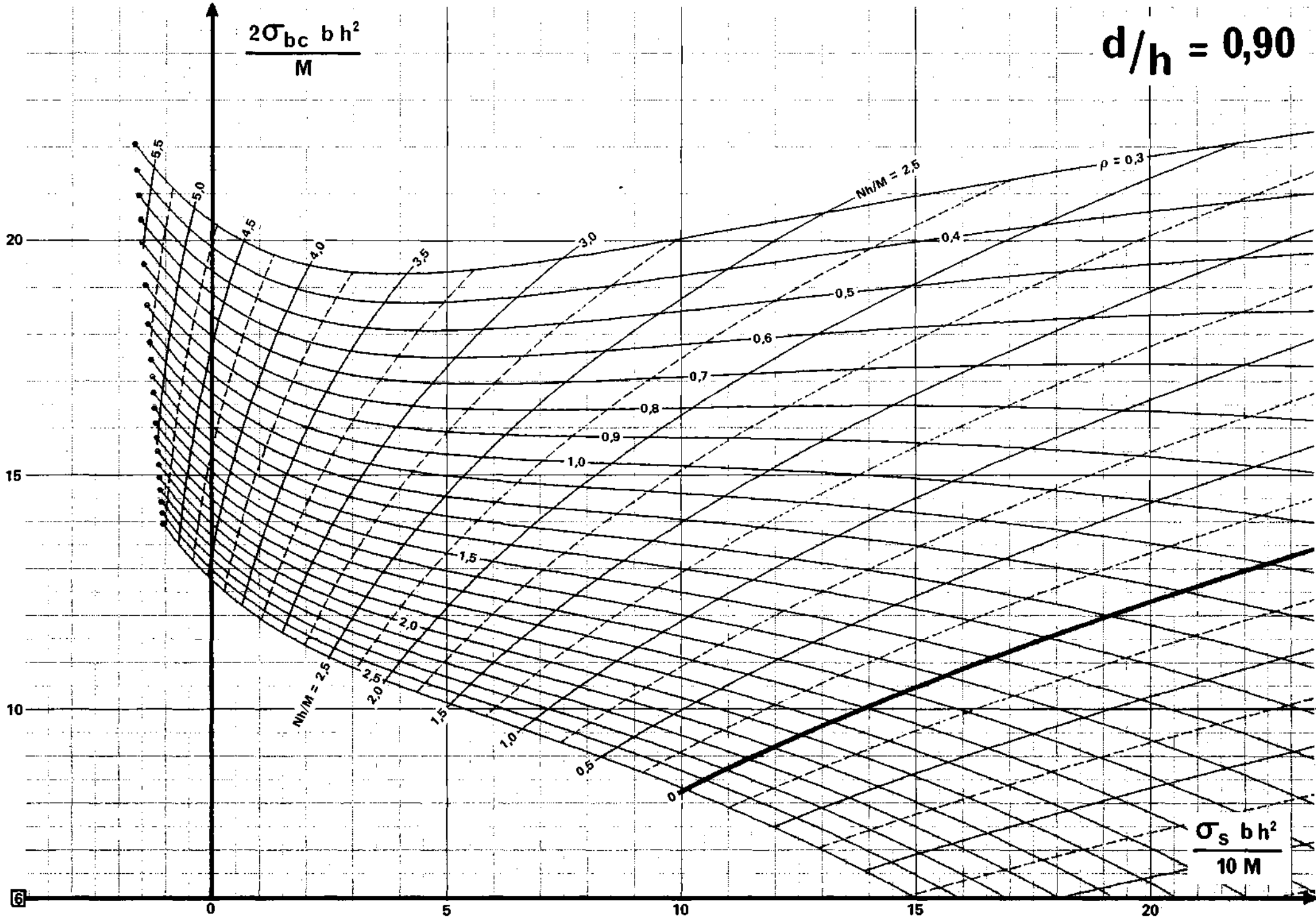
$$\frac{\sigma_{bc} b h^2}{M}$$

$$d/h = 0,90$$



$d/h = 0,90$

$$\frac{2\sigma_{bc} b h^2}{M}$$

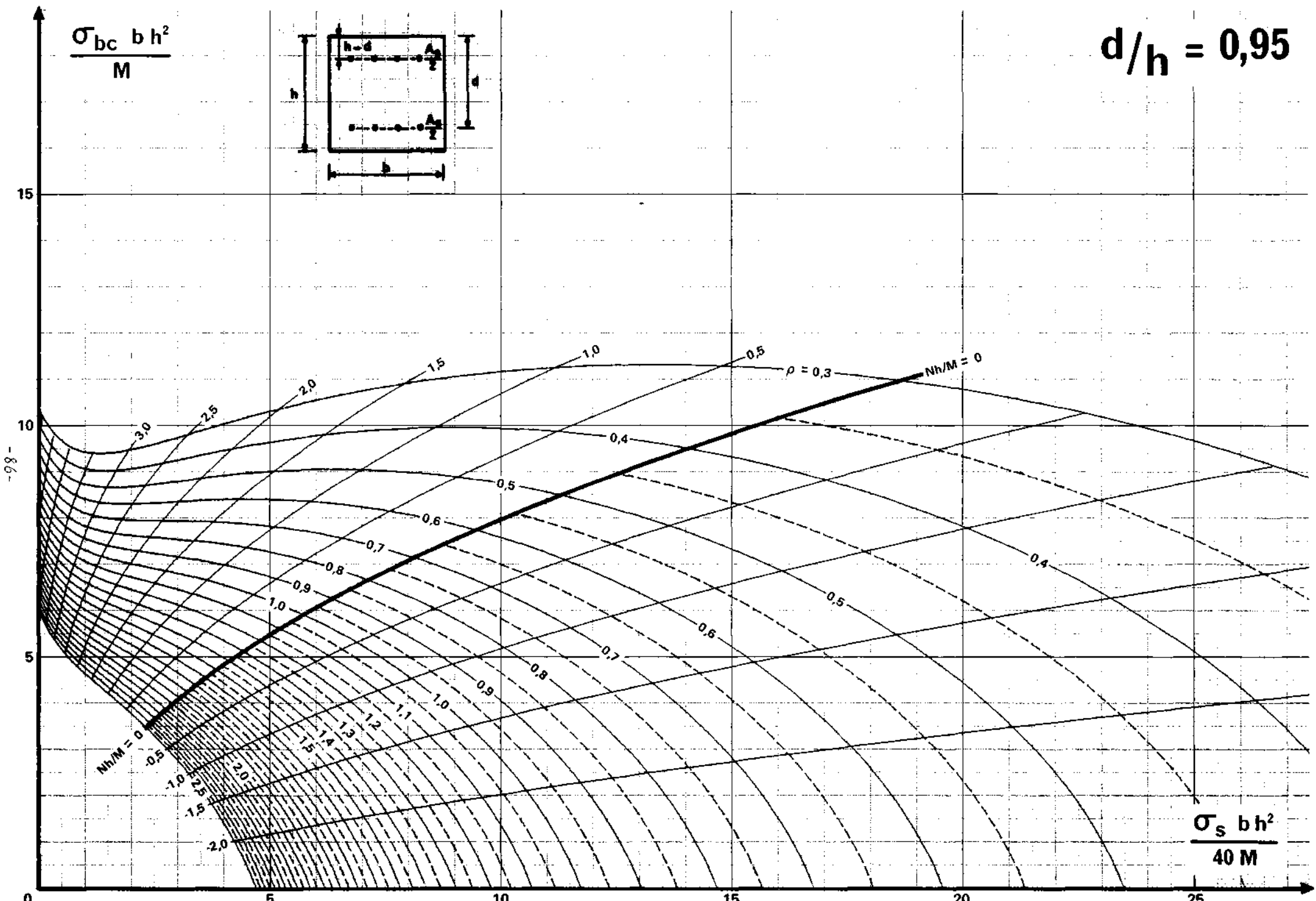
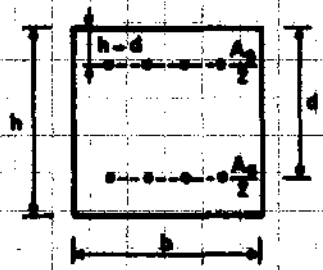


-85-



$d/h = 0,95$

$$\frac{\sigma_{bc} b h^2}{M}$$

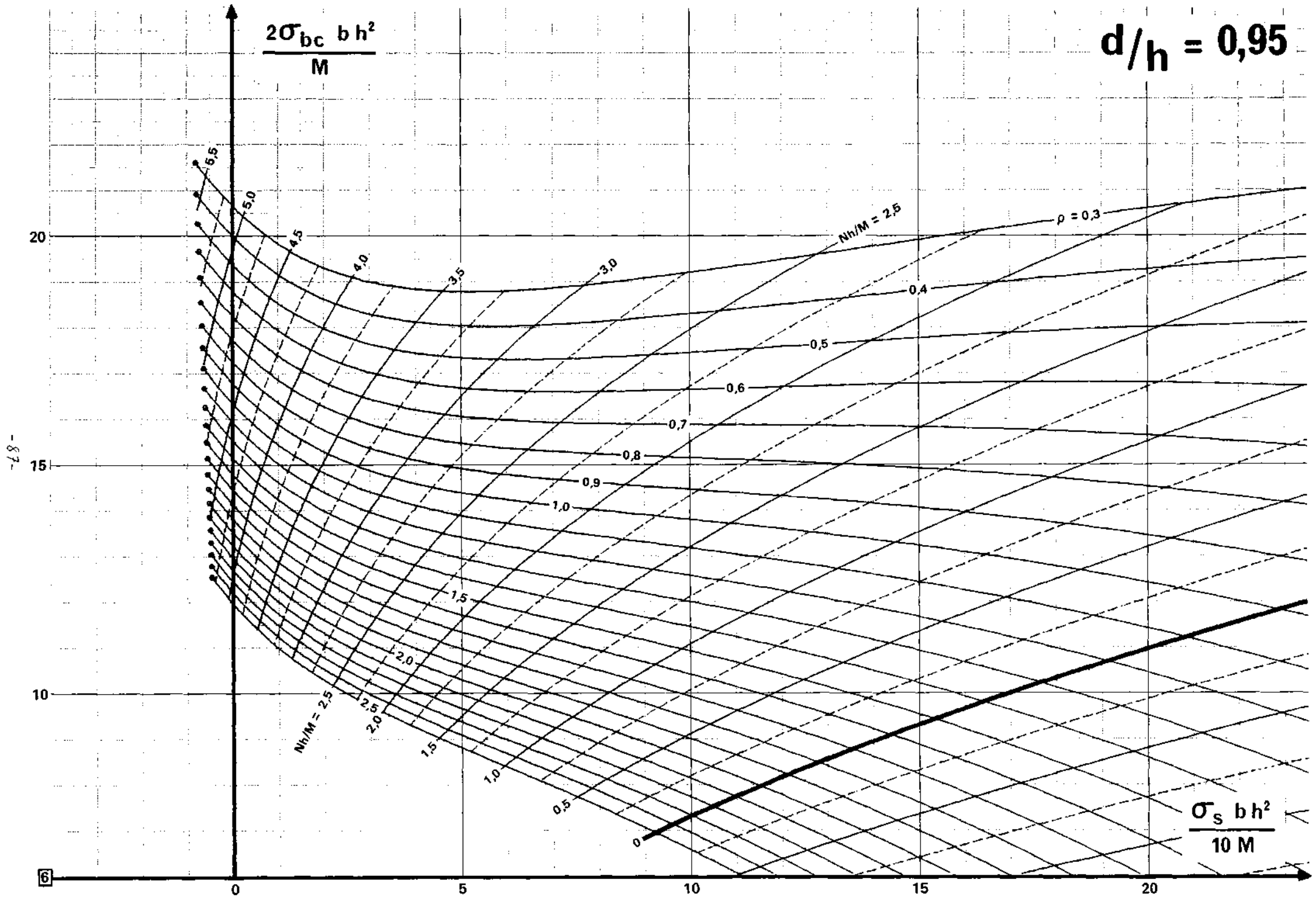


$$\frac{\sigma_s b h^2}{40 M}$$

-98-

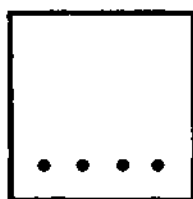
$d/h = 0,95$

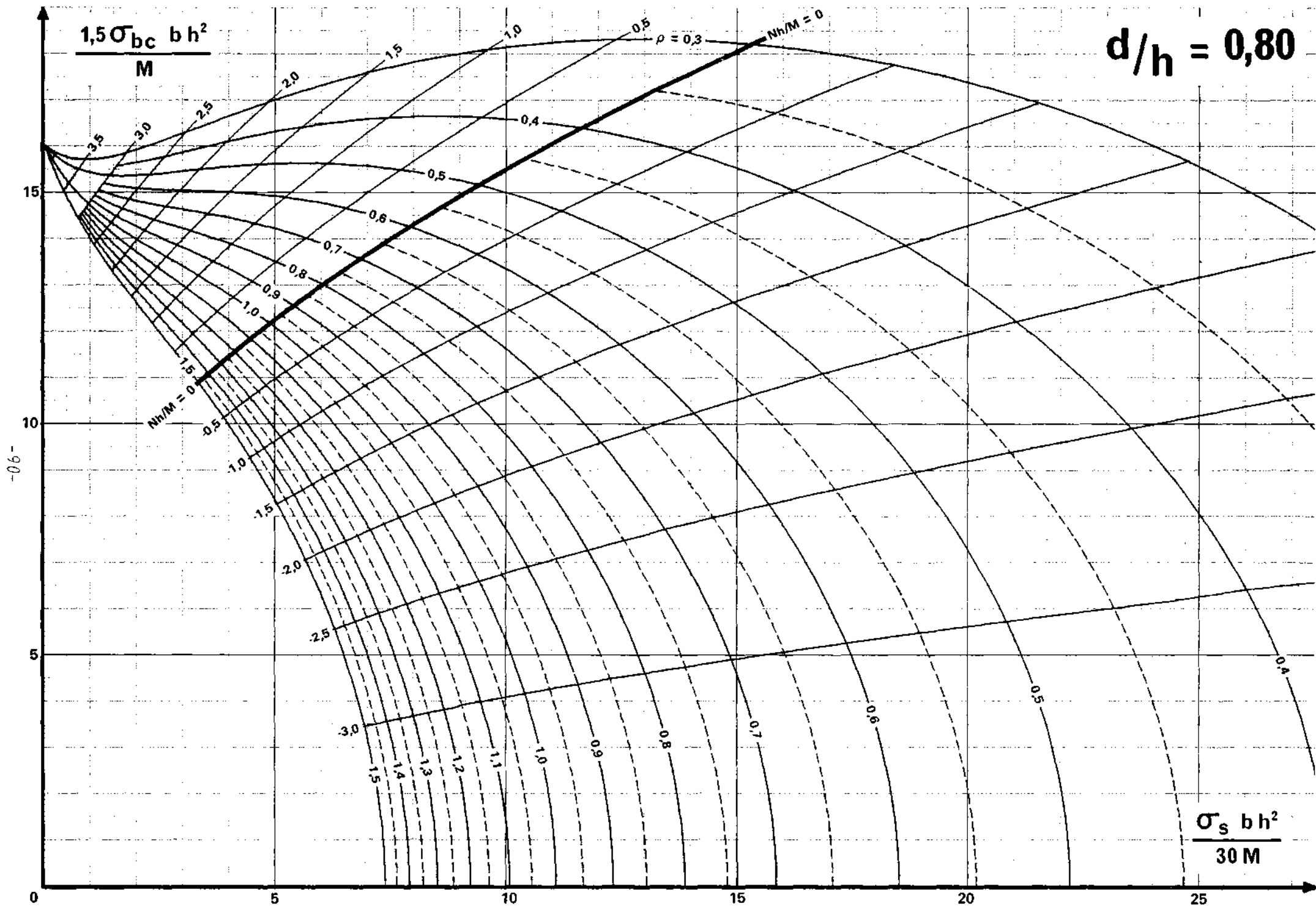
$$\frac{2\sigma_{bc} b h^2}{M}$$

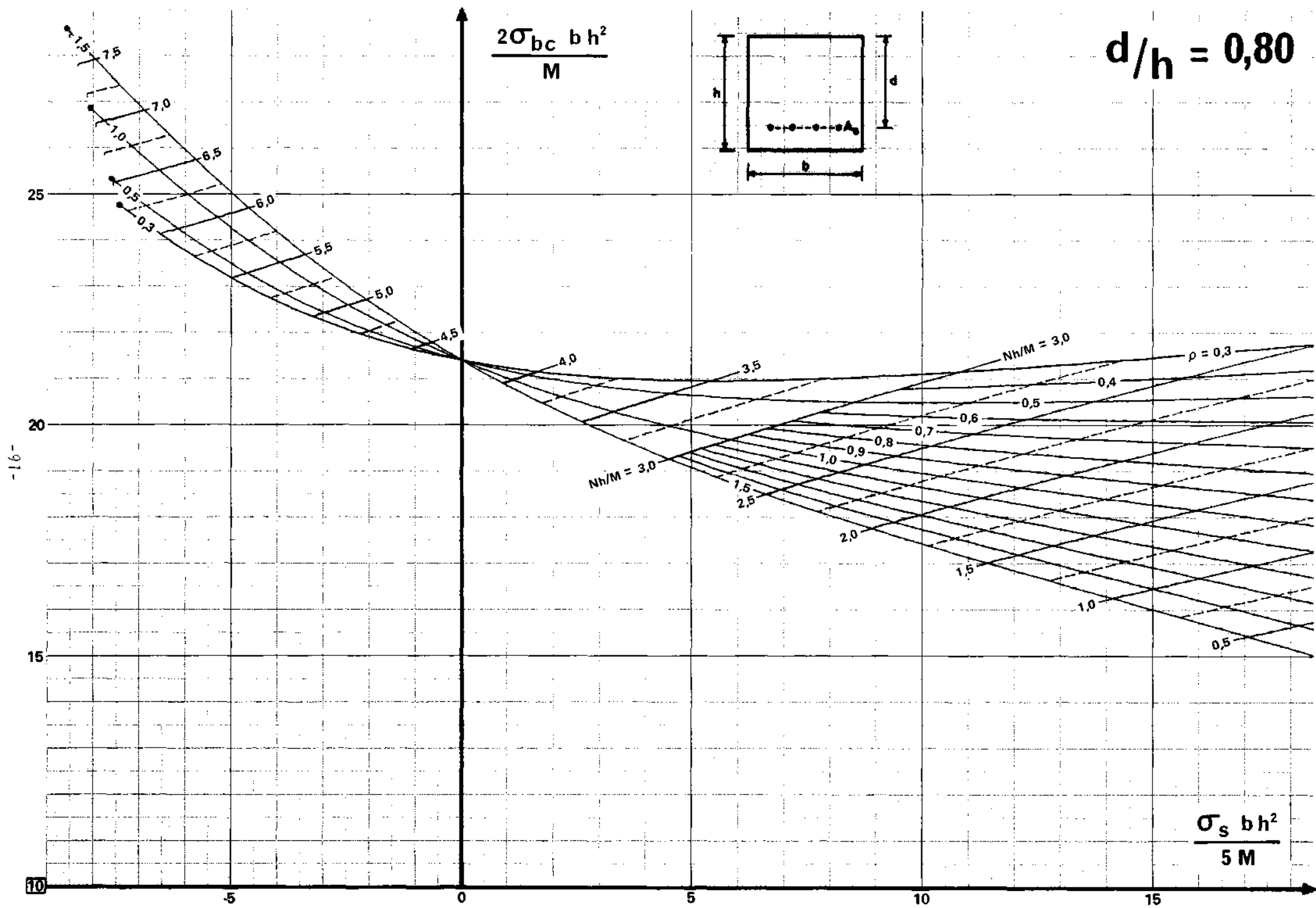


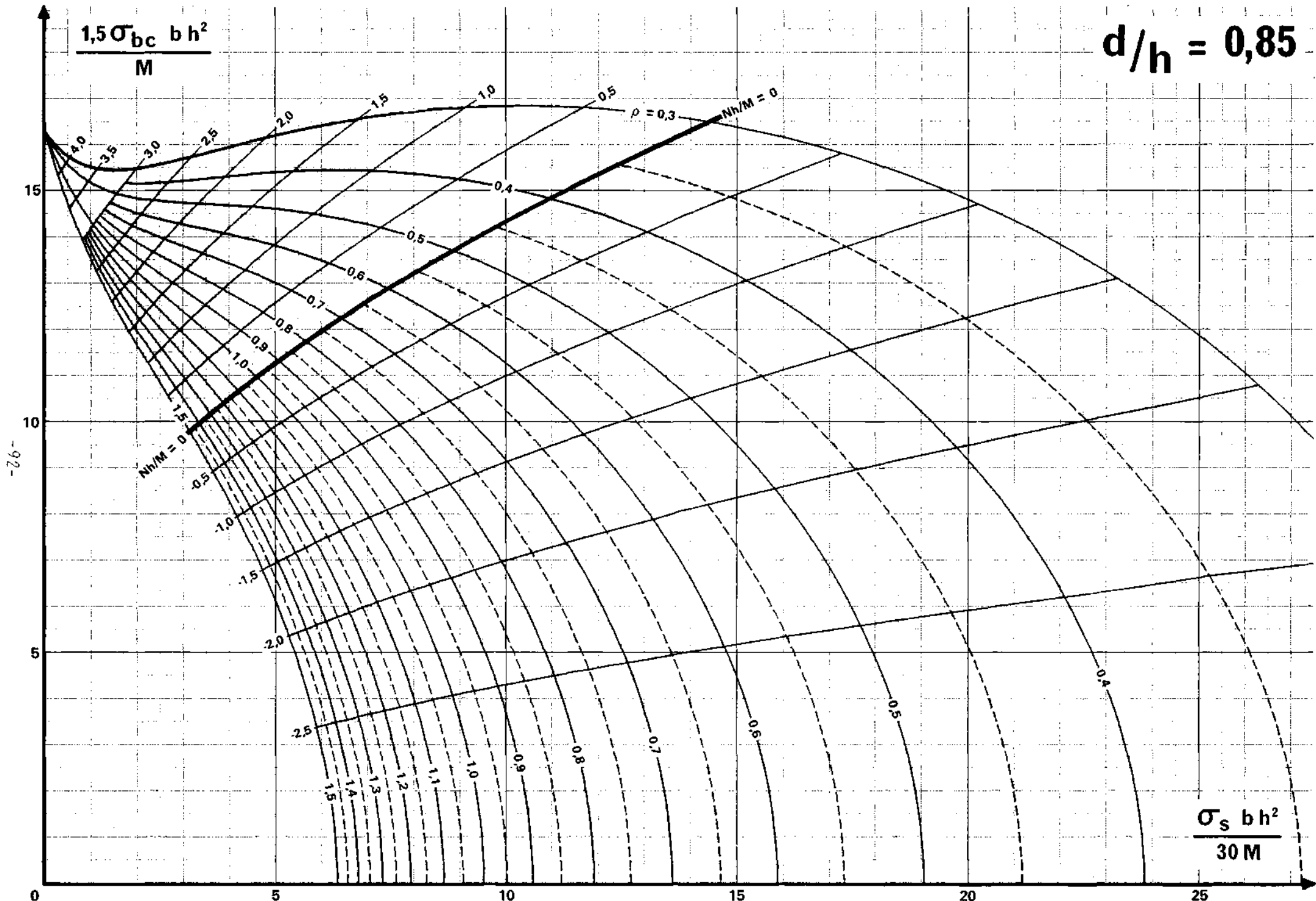
## ***ETAT-LIMITE DE SERVICE***

Section rectangulaire  
1 nappe d'armatures

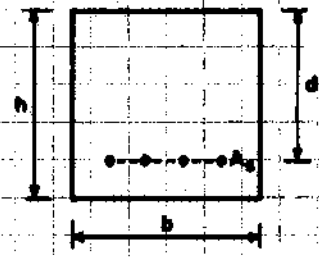




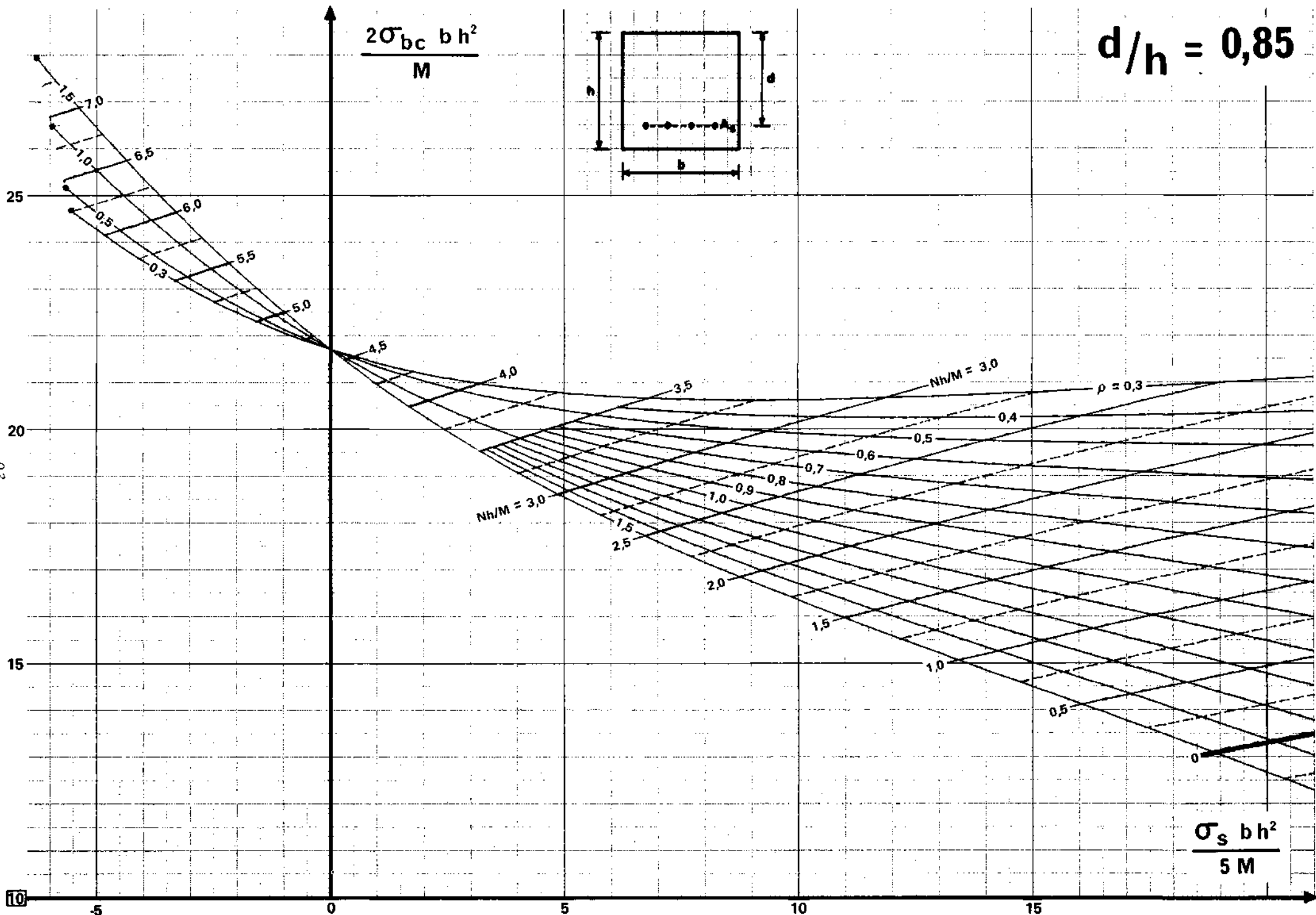




$d/h = 0,85$

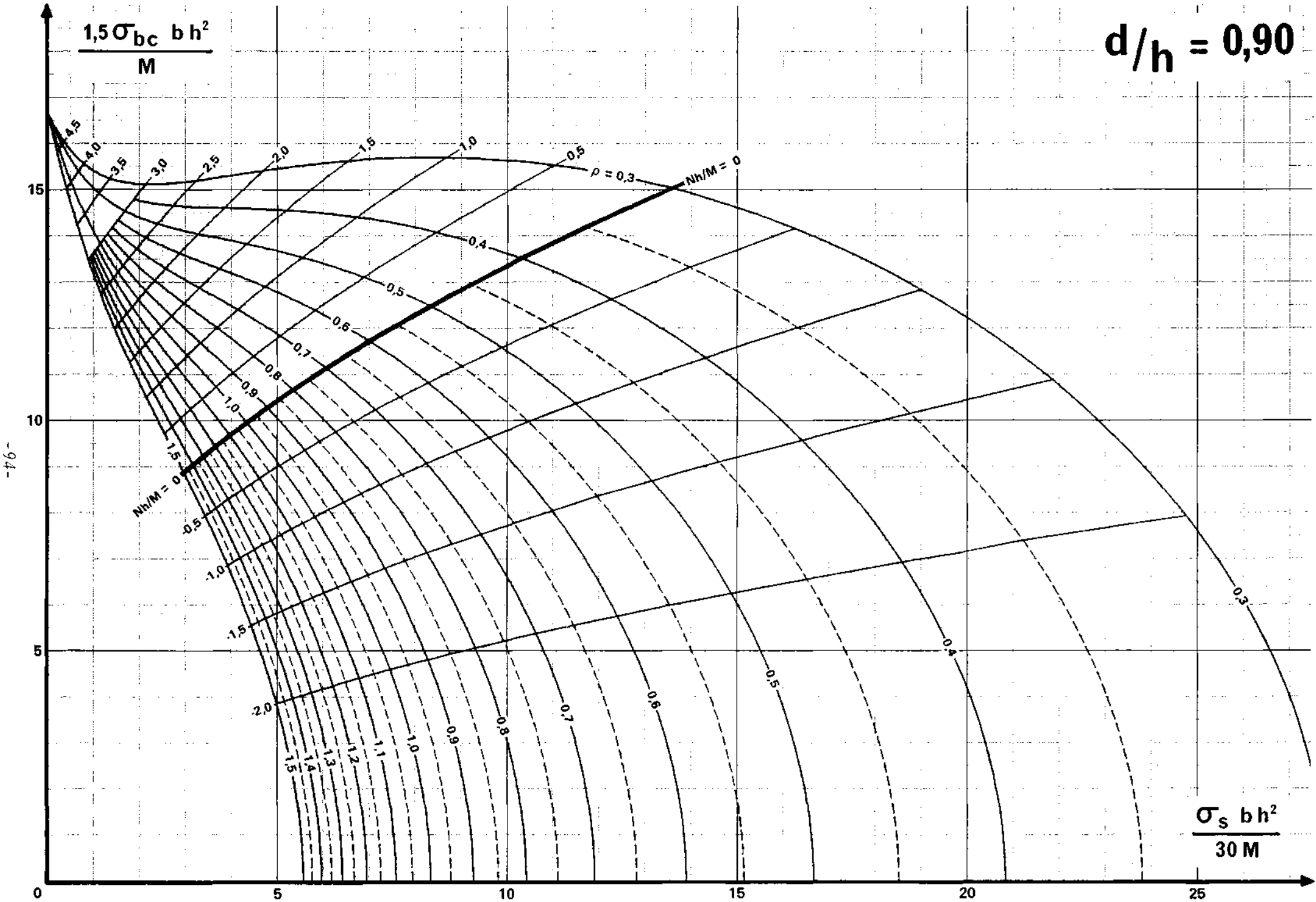


$$\frac{2\sigma_{bc} b h^2}{M}$$



-93-

$d/h = 0,90$



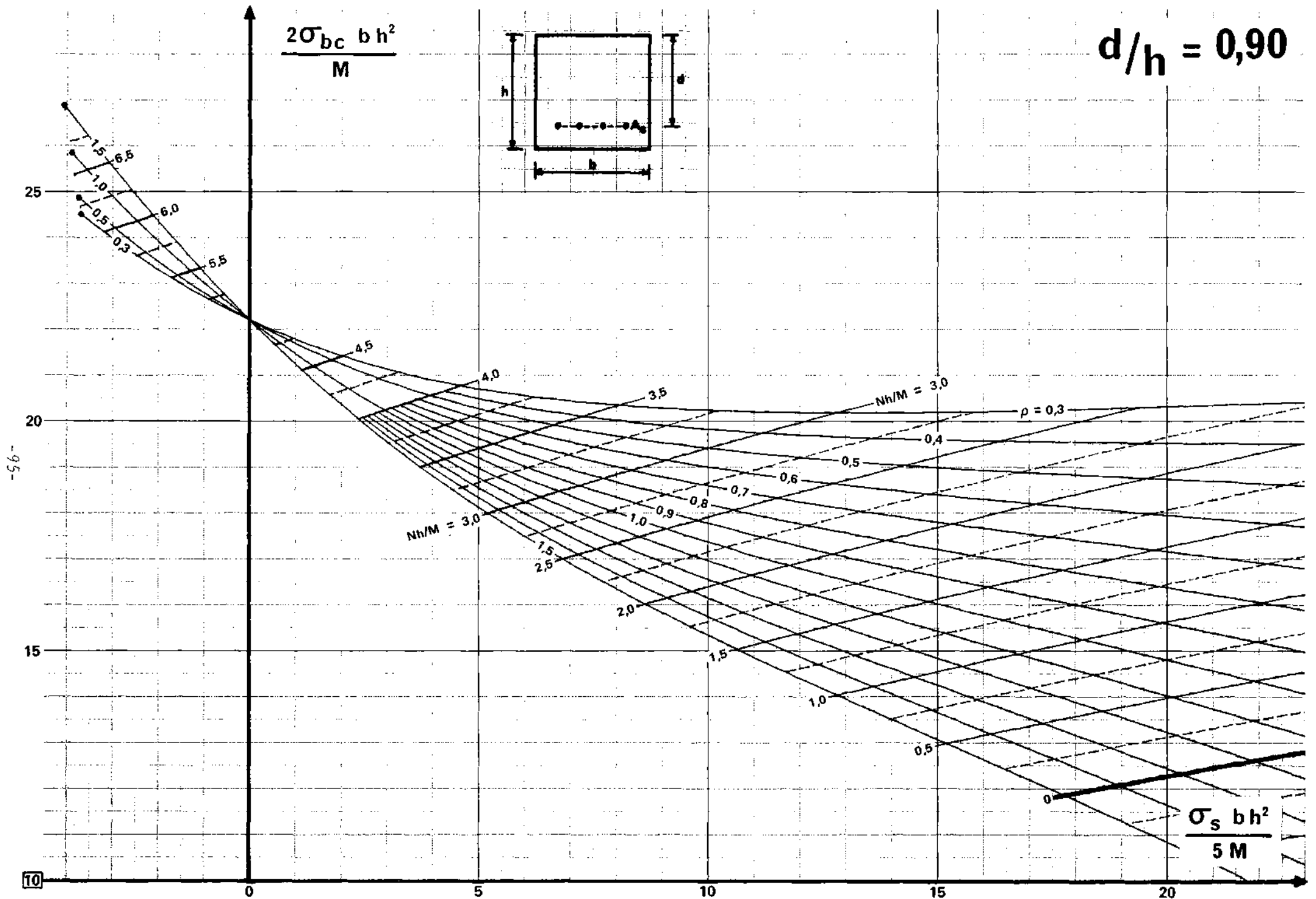
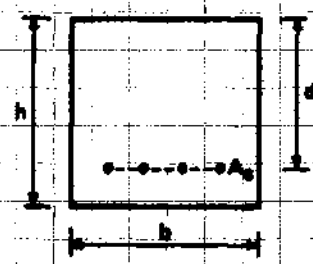
-94-

$\frac{\sigma_s b h^2}{30 M}$

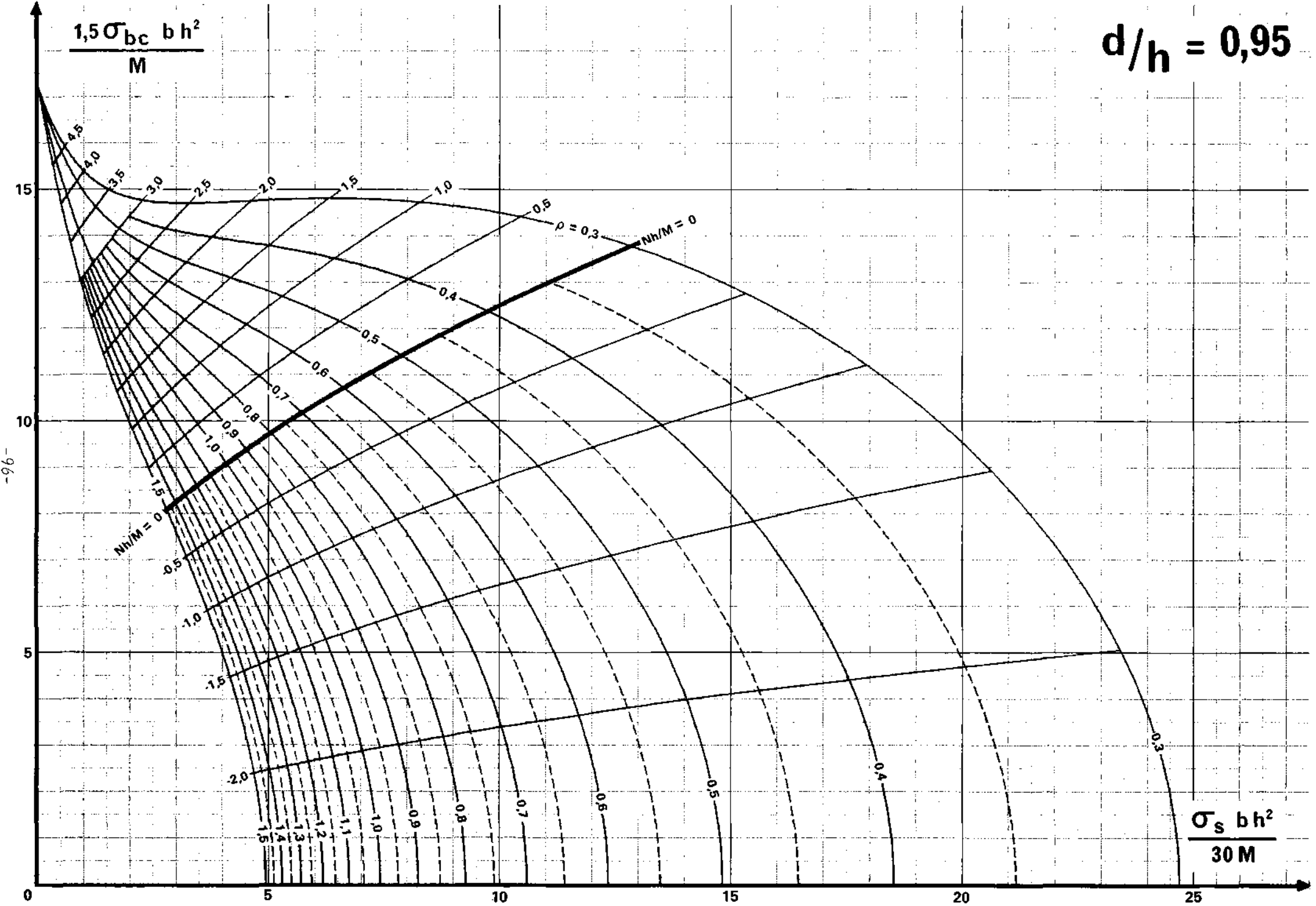


$d/h = 0,90$

$$\frac{2\sigma_{bc} b h^2}{M}$$



$d/h = 0,95$

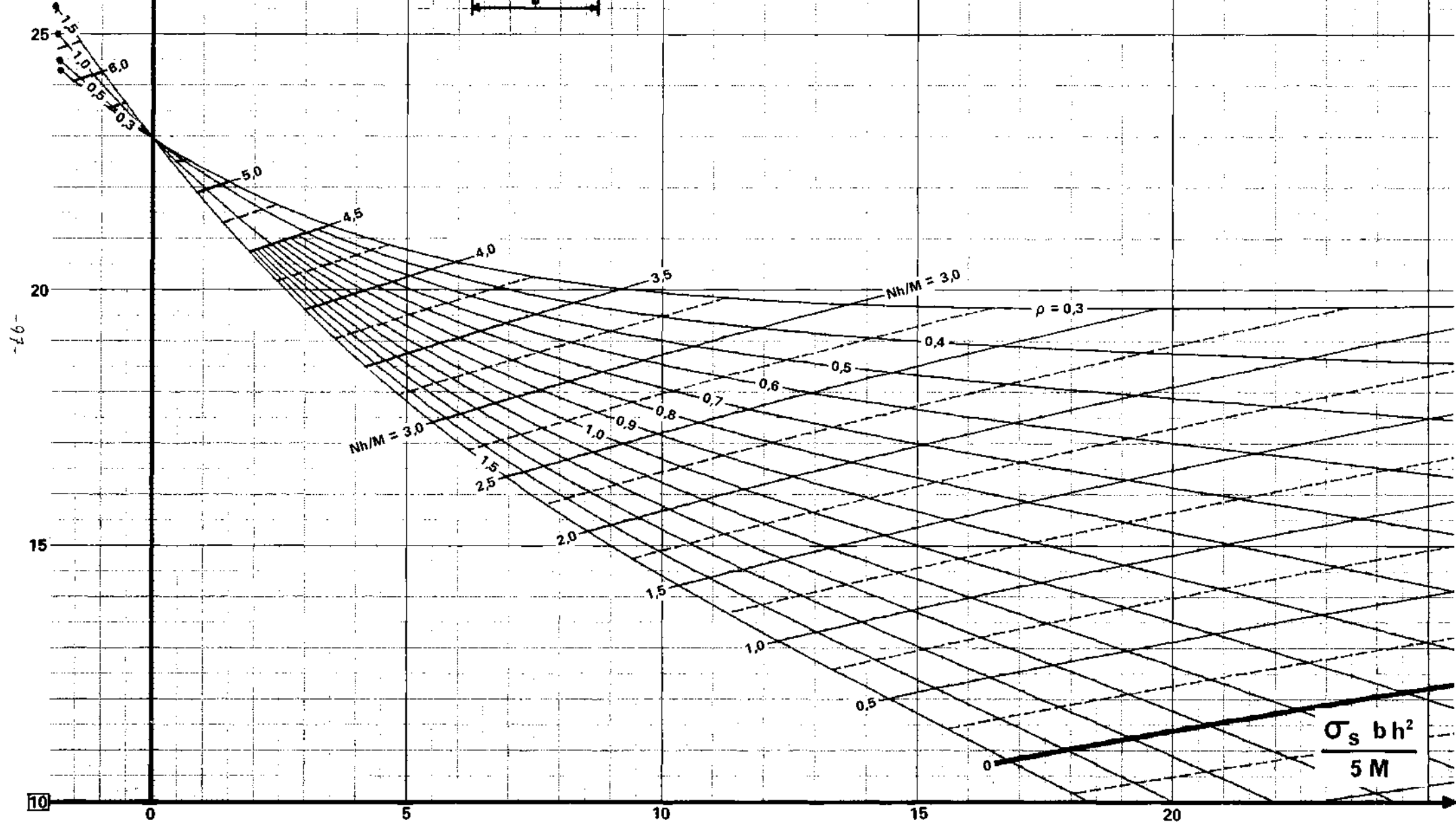
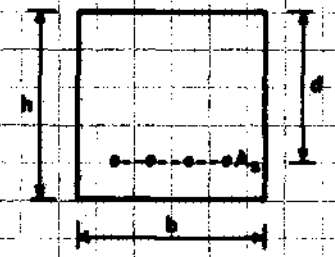


-96-

$\frac{\sigma_s b h^2}{30 M}$

$d/h = 0,95$

$$\frac{2\sigma_{bc} b h^2}{M}$$



-97-

