

Jean Pierre GIROUD
TRẦN-VÔ-NHIỄM
Jean Pierre OBIN

mécanique des sols

tables pour le calcul des fondations

tome 3

Dunod

MÉCANIQUE DES SOLS

**TABLES POUR LE CALCUL
DES FONDATIONS**

TOME 3

MÉCANIQUE DES SOLS

TABLES POUR LE CALCUL DES FONDACTIONS

PAR

Jean-Pierre GIROUD

TRÂN-VÔ-NHIÊM

Jean-Pierre OBIN

PRÉSENTATION DE

P. HABIB

Professeur de Mécanique des Sols
à l'École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

TOME 3

Force portante

DUNOD
Paris - Bruxelles - Montréal

Jean-Pierre GIROUD est né en 1938. Il est ingénieur de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures de Paris, Licencié ès Sciences, Docteur de Spécialité et doit soutenir prochainement une thèse de Doctorat ès Sciences. Il enseigne la Mécanique des Sols à Grenoble comme professeur à l'Institut Universitaire de Technologie et il est chargé, à l'Université, du cours de préparation au doctorat qui, jusqu'à ces dernières années, était le seul cours en France à ce niveau en Mécanique des Sols. Monsieur GIROUD a effectué seul, ou en collaboration, des recherches sur la physico-chimie des argiles, la locomotion tous terrains, les sols gelés, la terre armée, les granulats routiers, les remblais, et, plus particulièrement sur les fondations. Ces travaux ont fait l'objet d'une soixantaine de publications, de conférences et de communications à des congrès, en France et à l'étranger. Par ailleurs, en tant qu'ingénieur ou expert près les tribunaux, il a été consulté pour une cinquantaine de projets, notamment de fondations et de barrages en terre, domaine où il est l'auteur de certaines innovations techniques. Membre de la Commission Technique du Comité Français de Mécanique des Sols et de plusieurs sociétés savantes françaises et étrangères, Jean-Pierre GIROUD a reçu, en 1972, le "Prix des Jeunes" que la Société des Ingénieurs Civils de France décerne chaque année à un ingénieur de moins de 35 ans pour l'ensemble de ses travaux.

TRÂN-VÔ-NHIÊM est né à Haïphong en 1938. Il a fait ses études d'Ingénieur à l'Université de Louvain et ensuite s'est spécialisé en Mécanique des Sols à l'Université de Grenoble. Il a obtenu le grade de Docteur de cette Spécialité puis de Docteur-Ingénieur, en réalisant des recherches sur la portance limite des fondations superficielles et des ancrages sous charge inclinée. Attaché au Centre National de la Recherche Scientifique, il a étudié, à la demande d'Electricité de France (E.D.F.), le problème du calcul de la résistance limite à l'arrachement des fondations de pylônes et de haubans, et a mis au point le "PENEVANE", appareil léger de reconnaissance du sol permettant d'estimer directement cette résistance. L'utilisation de cet appareil est maintenant systématique dans les Centres Régionaux d'E.D.F., et le sera bientôt dans les pays membres de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (C.I.G.R.E). Actuellement Ingénieur Géotechnicien à la Société des Autoroutes Rhône-Alpes (A.R.E.A.), Monsieur NHIEM est chargé, entre autres, de l'étude de sols et fondations de plus de 250 ouvrages d'art de l'ensemble du réseau, ce qui lui permet de poursuivre des recherches sur la reconnaissance du sol et en particulier sur les pénétromètres.

Jean-Pierre OBIN est né en 1942. Il est ingénieur de l'Institut Industriel du Nord de la France (I.D.N.) et Docteur de Spécialité. Il enseigne la Mécanique Théorique comme Assistant à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble ainsi qu'à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble. Jean-Pierre OBIN poursuit actuellement ses recherches sur la force portante des fondations reposant sur des sols composés de plusieurs couches.

© BORDAS, 1973 — N° d'Éditeur : 122 730 207
D/1973/0190/214

ISBN 2-04-007349-3

"Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration".

*"Parmi les paroles sont les nombres,
qui sont les paroles les plus simples"*

Paul Valéry, (Eupalinos)

PRÉSENTATION

Le troisième tome de cette "Somme" rassemblée par M. Giroud présente les tables relatives aux calculs de la force portante des fondations superficielles. Pour cela, M. Giroud s'est senti obligé de prendre le concours de MM. Trân-Vô-Nhiêm et Obin. Il s'agit à la fois d'une marque de modestie, de la possibilité d'une collaboration de premier plan compte tenu des travaux personnels de chacun des trois auteurs, enfin de la manifestation d'une volonté affirmée de travailler en équipe. Tout cela n'est pas tellement fréquent et mérite d'être souligné d'entrée. Le travail de compilation, mais aussi le travail original contenus dans cet ouvrage ont été faits à l'Université de Grenoble. Il était normal qu'un tel ouvrage, dont l'utilité pour les bureaux d'études est évidente, soit réalisé dans un groupe de géotechniciens fortement spécialisé.

Les tables numériques relatives à la force portante des fondations sont d'un emploi moins simple que celles permettant les calculs de tassement. Cela tient à la nature des choses car les schémas de rupture sont plus complexes que ceux de la déformation élastique : y a-t-il glissement sous la fondation ? Quelle est la valeur du frottement de contact ? etc..., mais aussi : existe-t-il aujourd'hui une théorie exacte ? ou faut-il prendre une théorie approchée ou même approximative pour tel cas pratique rencontré ?

Il est probable que certains utilisateurs regretteront que les résultats présentés dans les sections 7-5, 7-6 et 7-7 du chapitre 7 soient obtenus par la méthode des cercles de glissement, méthode beaucoup moins noble que celle des réseaux de lignes caractéristiques. Un tel raisonnement me paraît fondamentalement erroné en ce sens que la loi de comportement des sols à la rupture est généralement connue avec une précision plus mauvaise que toutes les approximations qui sont faites ultérieurement dans les calculs, à condition évidemment de se référer à une méthode éprouvée. En ce sens la partie critique du travail précédant la

réalisation des Tables, qui bien entendu n'apparaît pas ici, est presque plus importante que le travail lui-même.

Ce tome 3 étant le dernier de l'ouvrage entier, je voudrais risquer un commentaire. Il est une activité particulièrement tentante et agréable : celle de faire des mathématiques inutiles dans l'espoir (caché) que le temps ainsi perdu ne sera pas utilisé à chercher où sont les vrais problèmes, source bien connue de complications inconfortables. Les ouvrages rédigés sous l'impulsion de M. Giroud devraient nous débarrasser de ce fléau en montrant d'une part que la plupart des problèmes réels sont encadrés par des solutions exactes ou approchées, donnant une précision suffisante ; en montrant aussi, par la complexité des sujets abordés, qu'un nouveau problème a peu de chance d'être résolu à moins d'un an de travail et qu'il est en général inutile de tenter cet effort pour un sujet dont la solution est espérée avant la fin de la semaine. L'utilisation des tables permet d'avoir une réponse rapide, en moins de deux heures dans les cas les plus défavorables et il peut même rester encore du temps pour réfléchir jusqu'au prochain week-end. En bref, l'emploi des Tables pour le calcul des fondations doit être regardé un peu comme celui des ordinateurs, pour débarrasser les ingénieurs de tâches harassantes et leur permettre de se consacrer à des travaux davantage en rapport avec leur métier, et en particulier à vérifier la validité des hypothèses de départ, à réfléchir sur le choix des coefficients de sécurité et à comparer diverses variantes de la solution envisagée.

P. HABIB,

Professeur de Mécanique des Sols
à l'Ecole Nationale du Génie Rural
des Eaux et des Forêts

Président de la Commission Technique
du Comité Français de la Mécanique
des Sols et des Fondations.

AVANT-PROPOS

De l'organisation de ce troisième volume

Les deux premiers volumes des "Tables pour le Calcul des Fondations" constituent la somme de tous les résultats théoriques actuellement disponibles, à notre connaissance, pour le calcul des tassements. Ce troisième volume est destiné à jouer le même rôle en ce qui concerne le calcul des forces portantes.

On remarque immédiatement que le parallélisme entre le troisième volume et les deux précédents est loin d'être parfait. Il eût été souhaitable, en effet, que le plan fût le même pour la première partie (volumes 1 et 2) consacrée au tassement, et la seconde (volume 3) consacrée à la force portante. Malheureusement ce n'était pas possible, et ceci pour plusieurs raisons :

- La première est que l'on ne sait pas, à quelques rarissimes exceptions près, tenir compte de la forme réelle de la fondation dans le calcul de la force portante. Toutes les études sont faites à deux dimensions^(*) et le seul paramètre caractérisant la fondation est sa largeur, B. Il n'était donc pas possible d'ordonner la seconde partie suivant les diverses formes de fondations rencontrées, comme c'était le cas pour la première partie (fondations circulaires, rectangulaires, ...).
- La seconde est que les formules de force portante données dans ce volume s'appliquent exclusivement aux fondations rigides alors que, dans la première partie, il était question tantôt de fondations rigides, tantôt de

(*) A notre connaissance, aucune étude théorique satisfaisante n'a encore été faite des problèmes de force portante à trois dimensions. Cependant, on trouve dans diverses publications des "coefficients de forme" (d'origine semi-empirique) permettant de passer des résultats bidimensionnels donnés ici, aux cas des fondations circulaires et rectangulaires. Nous ne donnons pas ces coefficients, d'ailleurs très variables selon les auteurs, estimant que cette question doit faire l'objet d'études complémentaires.

fondations souples, voire de remblais. Ceci vient du fait que le mécanisme du tassement est le même que la fondation soit rigide ou souple, alors que le mécanisme de la rupture est bien différent dans les deux cas. Une fondation rigide s'effondre dans son ensemble alors qu'une charge infiniment souple, comme un remblai, s'effondre par morceaux. La largeur du remblai n'intervient donc pas directement dans le calcul de stabilité comme intervient celle de la fondation rigide.

- La troisième raison est que si le choix des cas traités a été guidé principalement par leur intérêt en vue des applications, il l'a été aussi par la facilité de la solution. En d'autres termes, certains cas sont absents de cet ouvrage parce que non résolus, bien que très intéressants, alors que d'autres, moins intéressants, ont pu être résolus et sont présents. Or, il se trouve que ce ne sont pas systématiquement les mêmes cas qui sont difficiles à résoudre pour le tassement d'une part et la force portante d'autre part. Il en résulte que le plan des deux parties ne pourrait être le même qu'à condition de réduire l'ouvrage aux seuls cas résolus et en tassement et en force portante. C'aurait été priver le lecteur d'une grande quantité de résultats qui, bien que partiels, n'en sont pas moins utiles. Ce que nous n'avons pas voulu faire.

En conclusion, on voit qu'en l'état actuel de nos connaissances, un point de vue pragmatique conduisait à présenter le maximum de résultats, l'harmonie du plan de l'ouvrage dût-elle en souffrir.

De la rigueur des théories utilisées

Réaliser un livre destiné à fournir aux praticiens des méthodes de calcul rapidement utilisables n'est possible que moyennant une limitation stricte du nombre de paramètres qui, seule, permet une présentation simple des résultats. Pour cela il faut consentir à des approximations et le plus tentant est de les pratiquer sur les propriétés mécaniques du sol. On se sent d'autant plus justifié à le faire que l'on connaît très mal ces propriétés et que si on les connaissait bien on serait fort en peine d'en tenir compte avec les méthodes d'analyse dont on dispose actuellement. Ceci est vrai aujourd'hui mais ne le sera plus demain : en disant cela, on pense au développement des méthodes de calcul numérique qui permettent de faire entrer en jeu des lois de comportement des matériaux de plus en plus complexes.

Mais ces méthodes sont encore pour un temps l'apanage d'un nombre restreint de spécialistes et il faudra probablement toujours recourir à des recueils de résultats simples, soit pour une première approche des projets, soit pour un contrôle des résultats obtenus par des méthodes sophistiquées.

Dans cette optique, une schématisation très simple des propriétés mécaniques du sol a été adoptée pour la réalisation de ces tables : théorie de l'élasticité linéaire pour le calcul des tassements et théorie de la plasticité parfaite pour celui de la force portante. Mais c'est là que la première partie (volumes 1 et 2) et la seconde (volume 3) diffèrent : autant dans l'utilisation de la loi d'élasticité de Hooke pour établir les formules de tassement aucune approximation, si minime soit-elle, n'a été tolérée, autant avec la loi de plasticité de Coulomb il a été souvent nécessaire et, dans tous les cas, opportun, d'adopter certains processus approchés dans l'élaboration des solutions. Autrement dit, si une chose est discutable, pour le calcul des tassements, c'est le choix de la loi élastique pour caractériser le comportement du matériau mais, dès lors que ce choix est accepté, la suite est parfaitement rigoureuse. Au contraire, pour le calcul de la force portante, en plus du choix de la loi plastique, discutable bien entendu, les méthodes de résolution, même les plus classiques, comportent toutes des approximations, pas toujours nécessaires, mais toujours commodes. Ainsi, l'emploi de la formule proposée par Terzaghi^(*) signifie que la force portante est la somme de deux (en apparence trois) solutions partielles alors que rigoureusement cela n'est pas vrai. Autrement dit, cela revient à supposer qu'à l'instar des solutions élastiques les solutions plastiques peuvent se superposer, ce qui n'est pas. Cette approximation a toujours l'avantage de simplifier les calculs d'élaboration des tables mais elle a souvent l'inconvénient d'alourdir la présentation des résultats. Inconvénient que Terzaghi n'avait pas vu car il ne s'intéressait alors qu'au seul cas du sol horizontal homogène et isotrope avec charge verticale centrée alors que douze autres cas, quelquefois fort complexes, sont envisagés dans ces tables. On peut aller jusqu'à se demander dans quelle mesure nous ne sommes pas prisonniers de la tradition instaurée par Terzaghi et confortée par l'éclat de sa renommée : si l'on repartait de zéro maintenant, adopterait-on la même formulation additive pour la force portante ? Rien n'est moins sûr. Il faut cependant recon-

(*) Voir l' "Introduction au calcul des forces portantes" § 2a.

naître que, pour le praticien, la formulation de Terzaghi aura toujours l'immense mérite de mettre bien en évidence le rôle de la cohésion, paramètre souvent incertain, et il en est beaucoup qui pour cela sont prêts à payer le prix d'une approximation de quelques pour-cent, car finalement cela ne va guère plus loin, comme nous l'avons montré par ailleurs^(*).

Mais ce n'est pas tout, car, après une longue hésitation, il a été décidé d'inclure également dans ce Volume 3 des "Tables pour le Calcul des Fondations" un certain nombre de résultats (Sections 7-5, 7-6 et 7-7) obtenus par une méthode bien connue de l'ingénieur et qui consiste à faire l'hypothèse que la plasticité parfaite est atteinte le long d'une surface de glissement (que nous avons arbitrairement choisie circulaire). Cette méthode semble en tout état de cause moins rigoureuse que celle qui suppose l'équilibre limite atteint dans tout le massif, comme cela a été fait pour les autres sections de ce volume. Néanmoins, elle nous a permis d'étudier des cas complexes (sols composés de plusieurs couches) où l'hypothèse de la plasticité parfaite atteinte dans tout le massif risque d'être éloignée de la réalité, ou bien conduit à des difficultés analytiques non encore résolues.

Des concours apportés à ce volume

Les deux premiers volumes des Tables étaient terminés et le troisième, réduit à un seul chapitre, était en bonne voie. On y trouvait de nombreuses citations de la remarquable thèse de Trãn-Vô-Nhiêm^(**). Ce dernier, un jour, propose sa collaboration plus étroite, qui est acceptée d'emblée : il s'agissait, et de préciser les graphiques de la thèse par des tables de valeurs numériques, et d'étendre l'étude à de nouveaux cas. Sur la lancée fut requis le concours de J.P. Obin, avec qui nous étudions depuis quelque temps la force portante des sols polycouches^(***). L'importance des bagages de ces deux voyageurs supplémentaires allait

(*) J.P. Giroud et Trãn-Vô-Nhiêm, "Force portante d'une fondation sur une pente", *Annales de l'I.T.B.T.P.*, 283-284, TMC 142 (Juillet-Août 1971), 129-180.

(**) Trãn-Vô-Nhiêm, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble (Février 1971).

(***) L'essentiel de cette étude se trouve dans la thèse très complète de J.P. Obin, "Force portante en déformation plane d'un sol verticalement non homogène", Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Grenoble (Février 1972).

ralentir le train mais aussi, mais surtout, lui permettre d'aller plus loin, beaucoup plus loin. Voilà pourquoi ce volume comporte beaucoup moins de citations que les deux précédents, bon nombre de résultats qu'il contient n'ayant fait l'objet d'aucune publication préalable.

Avec mes deux collègues, nous remercions à nouveau toutes les personnes citées dans le premier volume pour avoir aidé à la réalisation de ces Tables et nous exprimons ici notre gratitude à tous ceux qui ont apporté une contribution particulière à ce volume. Nous pensons, en premier lieu, à M. M. Rey qui, comme pour les deux premiers volumes, a assuré la parfaite présentation des tables et des graphiques. Nous remercions les auteurs qui nous ont autorisés à reproduire leurs résultats et voudront bien nous excuser d'avoir dû en modifier la présentation originale, dans l'intérêt de l'homogénéité de l'ouvrage : MM. Davis, Christian, Mandel et Salençon. Ce dernier a droit à une reconnaissance particulière pour avoir bien voulu et nous communiquer de nombreux documents et nous donner d'utiles avis à la lecture du manuscrit. Nous remercions enfin M. P. Habib de l'honneur qu'il nous a fait en rédigeant le texte de présentation rendu indispensable par les quelques traits qui distinguent ce volume des deux précédents. Et les conclusions qu'il tire à l'occasion de la parution du dernier volume des Tables contribuent, avec les textes initiaux de MM. Caquot et Kravtchenko, à donner au lecteur une vue d'ensemble du plus haut intérêt.

J.P. G.

Juillet 1972

SOMMAIRE

TOME 1	{ - Préface - Introduction - Chapitre 1 : Généralités - Chapitre 2 : Charges concentrées - Chapitre 3 : Fondations circulaires	}	<u>1re Partie :</u> Tassement
TOME 2	{ - Chapitre 4 : Fondations rectangulaires - Chapitre 5 : Fondations de forme quelconque - Chapitre 6 : Fondations de grande longueur		
TOME 3	{ - Chapitre 7 : Charge normale centrée - Chapitre 8 : Charge inclinée et excentrée	}	<u>2e Partie :</u> Force Portante

TABLE DES MATIÈRES

DEUXIÈME PARTIE : FORCE PORTANTE

Présentation	VII
Avant Propos	IX
Liste des notations	XXI
Introduction au calcul des forces portantes	1
1 Définitions	1
2 Expression de la pression limite	2
3 Divers cas de calcul	3
Chapitre 7. – CHARGE NORMALE CENTREE	17
7.1 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un <u>sol homogène horizontal</u>	19
7.2 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un <u>sol horizontal finement stratifié</u>	29
7.3 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un <u>sol horizontal anisotrope</u>	43
7.4 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur une <u>couche horizontale et d'épaisseur finie de sol homogène</u>	49
7.5 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un sol <u>composé de deux couches horizontales</u>	65
7.6 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un sol <u>horizontal dont la cohésion varie avec la profondeur</u>	149
7.7 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un <u>sol horizontal contenant une nappe phréatique</u>	159
7.8 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge verticale centrée sur un <u>sol homogène en pente</u>	167
7.9 Fondation à <i>base oblique</i> exerçant une charge normale centrée sur un <u>sol homogène horizontal</u>	237

Chapitre 8. — CHARGE INCLINEE ET EXCENTREE	247
8.1 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge inclinée et excentrée sur <u>un sol horizontal homogène</u>	249
8.2 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge inclinée et excentrée sur un <u>sol homogène horizontal mais de niveau différent de part et d'autre de la fondation</u>	269
8.3 Fondation à <i>base horizontale</i> exerçant une charge inclinée et excentrée sur un <u>sol homogène en pente</u>	283
8.4 Fondation à <i>base oblique</i> exerçant une charge inclinée et excentrée sur un <u>sol homogène horizontal</u>	395
Index	439

LISTE DES NOTATIONS

Nous ne donnons ici que les notations générales utilisées dans plusieurs chapitres

- a : demi-largeur de fondations de longueur infinie, demi-côté parallèle à Ox de fondations rectangulaires.
- B : largeur des fondations rectangulaires ou des fondations de longueur infinie.
- b : longueur de semelle filante, demi-côté parallèle à Oy de fondation rectangulaire.
- c : cohésion du sol (pour les calculs de force portante), largeur de la pente d'un remblai (pour les calculs de tassement).
- D : profondeur de la base des fondations.
- d : distance.
- E : module d'Young du sol.
- E_x, E_y : distance entre le centre de la fondation et le point d'application de la charge suivant Ox et Oy.
- e_x, e_y : excentricité de la charge suivant Ox et Oy.
- e_{opt} : excentricité optimale.
- F : force appliquée sur le sol (également : coefficient de sécurité).
- f : force par unité de longueur.
- f_n, f_t : composantes normale et tangentielle de f.
- f_n^{lim} : force portante par unité de longueur.
- g : accélération de la pesanteur.
- H : épaisseur d'une couche de sol reposant sur un substratum (rarement : cohésion normale, $H = c \cotg \phi$).
- h : hauteur du remblai.

- L : longueur des fondations rectangulaires.
 M : moment.
 M_x, M_y : moments respectivement autour de Ox et de Oy .
 N : composante normale de F .
 p : contrainte normale uniforme.
 p_{adm} : pression admissible.
 p_{lim} : pression limite.
 q : contrainte normale suivant une distribution linéaire antisymétrique.
 R : rayon des fondations circulaires.
 r : distance radiale.
 r, θ, z : coordonnées cylindriques d'un point.
 r_{cq}, r_γ : coefficients de réduction sur la force portante dus à l'excentricité de la charge.
 s : contrainte tangentielle uniforme.
 T : composante tangentielle de F .
 t : contrainte tangentielle suivant une distribution linéaire symétrique.
 u, v : composantes horizontales du déplacement (coordonnées cartésiennes).
 u_r, u_θ : composantes horizontales du déplacement (coordonnées cylindriques).
 u_ρ, u_θ, u_ψ : composantes du déplacement (coordonnées sphériques).
 w : tassement (composante verticale du déplacement).
 w_m : tassement moyen.
 x, y, z : coordonnées cartésiennes d'un point.
 α : rapport des côtés d'un rectangle (Volumes I et II).
 β : pente du terrain (quelquefois : épaisseur adimensionnelle de la couche).
 γ : poids volumique du sol.
 γ' : poids volumique immergé.
 γ_d : poids volumique sec.
 γ_{sat} : poids volumique saturé.
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$: composantes tangentielles du tenseur déformation (distorsions).
 δ : inclinaison de la charge.
 δ' : inclinaison des contraintes au contact de la fondation et du sol.
 δ^* : inclinaison fictive de la charge.
 ε : variation de volume du sol (sert quelquefois à désigner $+ 1$).
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: composantes normales du tenseur déformation (dilatations).

- ζ : désigne z/a ou $z/2a$.
- θ : angle entre Ox et Or .
- ν : coefficient de Poisson du sol.
- π : 3,1416.
- ρ : distance entre l'origine O et le point considéré (quelquefois : masse volumique du sol).
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: composantes normales du tenseur contrainte.
- σ_m : contrainte moyenne.
- $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: composantes tangentielles du tenseur contrainte.
- \emptyset : angle de frottement interne du sol.
- ϕ : rotation.
- ϕ_x, ϕ_y : rotation autour de Ox , de Oy .
- ϕ_m : rotation moyenne.
- ψ : angle entre l'axe Oz et l'axe Op .
- ω : inclinaison de la base d'une fondation.

SYMBOLES DES COEFFICIENTS DE FORCE PORTANTE

CHAPITRE 7

Section 7-1

$$\emptyset \neq 0$$

$$N_c$$

$$N_q$$

$$N_\gamma$$

$$\emptyset = 0$$

$$N_c^0$$

Section 7-2

$$\emptyset \neq 0$$

$$N_c^-$$

$$N_q^-$$

$$N_\gamma^-$$

$$\emptyset = 0$$

$$N_c^{\bar{0}}$$

Section 7-3

$$\emptyset = 0$$

$$N_c^{*0}$$

Section 7-4

$$\emptyset \neq 0$$

$$N_{cH} = \xi_c N_c$$

$$N_{qH} = \xi_q N_q$$

$$N_{\gamma H} = \xi_\gamma N_\gamma$$

$$\bar{N}_{cH} = \bar{\xi}_c N_c$$

$$\bar{N}_{qH} = \bar{\xi}_q N_q$$

$$\bar{N}_{\gamma H} = \bar{\xi}_\gamma N_\gamma$$

Section 7-5

$$\emptyset \neq 0$$

$$N_{\gamma c 2H}$$

$$c_1 = c_2 = 0$$

$$N_{\gamma 2H}$$

$$\emptyset_1 = \emptyset_2 = 0$$

$$N_{c 1 2H}$$

Section 7-6

$$\emptyset = 0$$

$$N_{cz}^0$$

Section 7-7

 $\phi \neq 0$ $N'_{\gamma c}$

Section 7-8

 $\phi \neq 0$ $N_{c\beta}$ $N_{q\beta}$ $N_{\gamma\beta}$ $\phi = 0$ $N^0_{c\beta}$

Section 7-9

 $\phi \neq 0$ $N_{c\omega}$ $N_{q\omega}$ $N_{\gamma\omega}$ $\phi = 0$ $N^0_{c\omega}$ CHAPITRE 8

Section 8-1

 $\phi \neq 0$ $N_{c\delta}$ $N_{q\delta}$ $N_{\gamma\delta}$ $\phi = 0$ $N^0_{cq\delta}$

Section 8-2

 $\phi \neq 0$ $N_{c\delta}$ $N_{q\delta}$ $N_{\gamma h\delta}$ $\phi = 0$ $N^0_{cq\delta}$

Section 8-3

 $\phi \neq 0$ $N_{c\beta\delta}$ $N_{q\beta\delta}$ $N_{\gamma\beta\delta}$ $\phi = 0$ $N^0_{cq\beta\delta}$

Section 8-4

 $\phi \neq 0$ $N_{c\omega\delta}$ $N_{q\omega\delta}$ $N_{\gamma\omega\delta}$ $\phi = 0$ $N^0_{cq\gamma\omega\delta}$

INTRODUCTION AU CALCUL DES FORCES PORTANTES

Cette Introduction au Calcul des Forces Portantes n'est qu'un complément à l'Introduction générale des "Tables pour le Calcul des Fondations" que l'on trouvera en tête du volume 1 et à laquelle il est indispensable de se reporter avant de lire ce qui suit.

1. DEFINITIONS

1a. Géométrie des fondations

Une fondation rectangulaire est définie par sa longueur L, sa largeur B et la profondeur D à laquelle est située sa base^(*) (Fig. 1). Ce dernier terme fait l'objet d'une définition spéciale dans certains cas particuliers : *sol en pente* (sections 7-8 et 8-3), *sol de niveau différent de part et d'autre de la fondation* (section 8-2) et *fondation à base oblique* (sections 7-9 et 8-4).

Rappelons que les résultats donnés dans cet ouvrage ne sont valables que pour les fondations superficielles (D/B petit, c'est-à-dire inférieur à 2 ou 3).

Pour les raisons indiquées dans l'avant-propos, seuls les problèmes à deux dimensions sont traités dans ce volume. Ainsi, le seul paramètre, caractérisant la dimension de la fondation, qui intervienne dans les formules est la

(*) Les formules proposées dans ce volume pour le calcul de la pression limite ne sont valables que si la base de la fondation est rugueuse. Avec les fondations habituelles en béton armé, cette condition est aisément vérifiée. Et même si elle ne l'était pas, il n'y aurait guère de problème car il suffit que la fondation soit légèrement enterrée ($D \neq 0$) pour que la force portante ne dépende pratiquement pas de l'état de surface de la base.

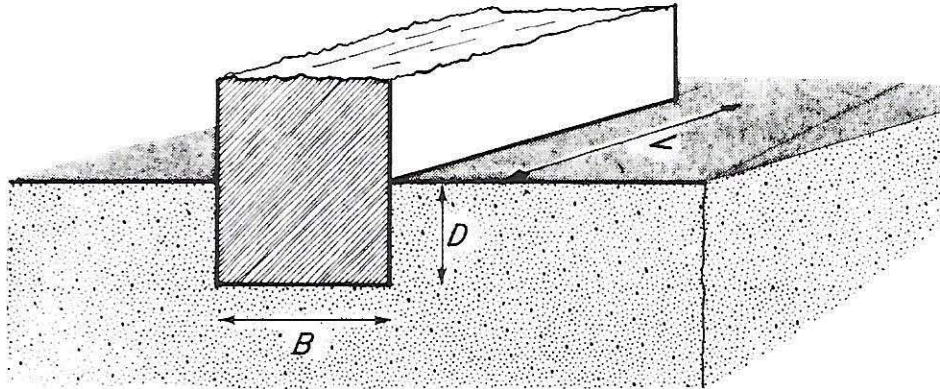


FIG. 1. — Géométrie d'une fondation à base rectangulaire.

largeur, B . En présence d'un problème à trois dimensions (fondation rectangulaire ou circulaire) le lecteur peut adopter l'une des deux attitudes suivantes :

- soit, considérer que les formules données dans ce volume sont valables sans modification, quelle que soit la longueur des fondations (et, s'il s'agit d'une fondation circulaire de rayon R , en prenant $B = 2 R$) ;
- soit, modifier la valeur des coefficients de force portante donnés dans ce volume à l'aide de coefficients correcteurs dépendant de la forme de la fondation.

La première façon de procéder est dans le sens de la sécurité. La seconde peut sembler plus proche de la réalité mais les divers auteurs ne sont pas d'accord sur la valeur de ces coefficients correcteurs. Aussi, estimant que cette question doit faire l'objet d'études complémentaires, nous ne donnerons pas d'indications sur ces coefficients, laissant le lecteur libre de faire son choix dans la littérature traitant de cette question (voir la bibliographie à la fin de cette Introduction).

1b. Force portante

On appelle force portante (ou charge limite) la *composante normale* de la force limite (force qui provoque la rupture du sol) (Fig. 2). En fait, les problèmes traités étant à deux dimensions (fondations infiniment longues), on parlera plutôt de force portante (ou charge limite) par unité de longueur de la fondation que l'on désigne par $f_n \text{ lim}$.

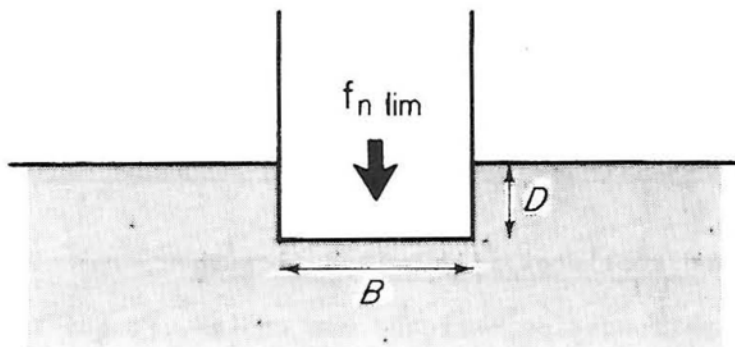


FIG. 2. — Définition de la fondation et de la charge limite.

1c. Pression limite ou pression portante

On appelle pression limite (ou pression portante) la force portante divisée par la surface de la fondation. En pratique, les problèmes traités étant à deux dimensions, c'est la *force portante par unité de longueur*, $f_n \text{ lim}$, que l'on divise par la *largeur de la fondation*, B , pour obtenir la pression limite, P_{lim} :

$$(1) \quad P_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

Notons qu'il ne s'agit que d'une pression moyenne et rien ne dit qu'elle est uniformément répartie au contact de la fondation et du sol.

1d. Pression admissible

On appelle pression admissible (ou *taux de travail*) la pression moyenne qu'il convient de ne pas dépasser dans la pratique pour être assuré de la stabilité d'une fondation. Elle est égale à la pression limite divisée par un coefficient de sécurité, F , généralement égal à 3^(*) :

$$(2) \quad P_{\text{adm}} = \frac{P_{\text{lim}}}{F}$$

(*) Cette valeur s'entend pour les fondations de bâtiments. On prend, en général, des coefficients de sécurité beaucoup plus faibles pour les remblais. Mais, comme on l'a dit dans l'avant-propos, les fondations de remblais ne sont pas traitées dans ce volume.

Cette pression admissible, comme la pression limite, dépend à la fois des propriétés du sol, de la géométrie de la fondation et de la charge qu'elle exerce. On ne peut donc pas définir, pour un sol donné, un taux de travail valable quelle que soit la fondation et quelles que soient les conditions de chargement.

1e. Inclinaison réelle et inclinaison fictive

Considérons une fondation exerçant une charge, F , qui fait un angle δ avec la normale à la surface du sol (Fig. 3). Lorsque le sol possède à la fois du frottement et de la cohésion, la résolution des problèmes de charge limite à l'aide du théorème des états correspondants de Caquot conduit à définir une charge limite fictive, F_{lim}^* , somme vectorielle de la charge limite réelle, F_{lim} , et d'une force $LBc \cotg \phi$, surcharge normale fictive due à l'action de la cohésion sur la surface de la fondation, LB :

$$(3) \quad \vec{F}_{lim}^* = \vec{F}_{lim} + \overrightarrow{LBc \cotg \phi}.$$

Pour les problèmes à deux dimensions, l'expression précédente devient :

$$(4) \quad \vec{f}_{lim}^* = \vec{f}_{lim} + \overrightarrow{Bc \cotg \phi}$$

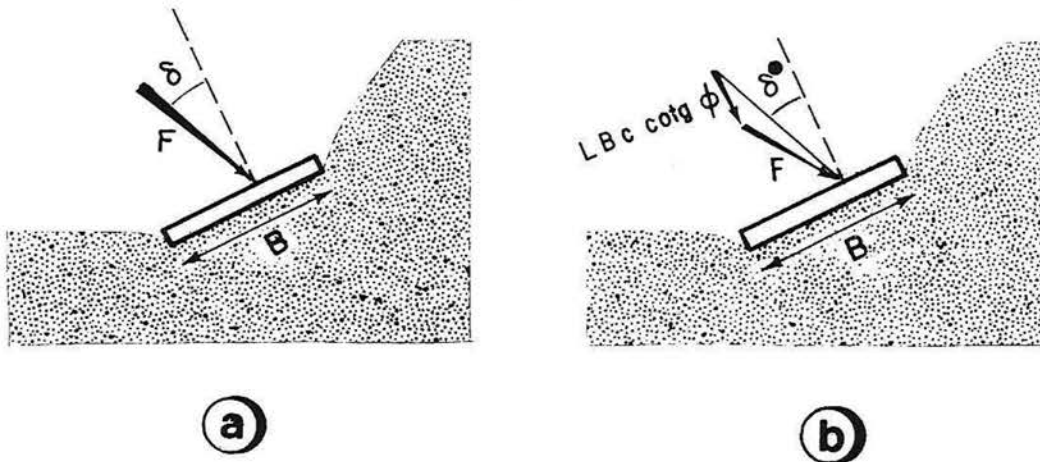


FIG. 3. — Fondation de largeur B exerçant sur le sol une charge inclinée (excentrée ou non).

a) Inclinaison réelle, δ ,

b) Inclinaison fictive, δ^* .

avec :

f_{lim}^* et f_{lim} : forces limites, respectivement fictive et réelle, par unité de longueur.

L'inclinaison de cette charge fictive est appelée inclinaison fictive et elle est définie par :

$$(5) \quad \operatorname{tg} \delta^* = \frac{F_{lim} \sin \delta}{F_{lim} \cos \delta + LBc \cotg \emptyset}$$

ou, à deux dimensions :

$$(6) \quad \operatorname{tg} \delta^* = \frac{f_{lim} \sin \delta}{f_{lim} \cos \delta + Bc \cotg \emptyset} .$$

Mais, d'après la définition donnée plus haut (§ 1b), on a, à trois dimensions :

$$(7) \quad P_{lim} = \frac{F_{lim} \cos \delta}{LB}$$

avec :

$F_{lim} \cos \delta = F_{n \ lim}$: composante normale de F_{lim} .

Et, à deux dimensions :

$$(8) \quad P_{lim} = \frac{f_{lim} \cos \delta}{B}$$

avec :

$f_{lim} \cos \delta = f_{n \ lim}$: composante normale de f_{lim} .

Il en résulte que :

$$(9) \quad \operatorname{tg} \delta^* = \frac{P_{lim} \operatorname{tg} \delta}{P_{lim} + c \cotg \emptyset} .$$

Cette expression montre que l'*inclinaison fictive*, δ^* , est toujours inférieure à l'*inclinaison réelle*, δ . Ces deux inclinaisons ne sont égales que dans le cas d'un sol sans cohésion ($c = 0$). On montre qu'une excellente approximation

de δ° est fournie par (*) :

$$(10) \quad \delta^\circ \approx \frac{\delta}{1 + \frac{c \cotg \phi \cos \delta}{p_{lim}}}$$

2. EXPRESSION DE LA PRESSION LIMITE

2a. La formule de TERZAGHI

Par souci de simplicité et d'homogénéité, nous avons décidé de représenter, dans tous les cas, la pression limite par une formule analogue à celle utilisée par Terzaghi pour un sol homogène horizontal :

$$(11) \quad p_{lim} = cN_c + \gamma DN_q + \frac{1}{2} \gamma BN_\gamma$$

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

D : profondeur de la base de la fondation (voir Fig. 1)

B : largeur de la fondation

N_c, N_q, N_γ : coefficients sans dimensions dépendant uniquement de ϕ

ϕ : angle de frottement interne du sol.

Sans en changer la forme générale, nous avons adapté cette formule à chaque cas particulier de deux façons :

- en remplaçant les coefficients N_c, N_q et N_γ relatifs au cas du sol homogène horizontal par trois coefficients analogues dépendant non seulement de ϕ mais aussi d'autres paramètres caractérisant le cas considéré ;
- en multipliant certains des trois termes de la formule par un coefficient dépendant des paramètres du cas considéré.

(*) Dans les formules (9) et (10) on voit que δ° est fonction de p_{lim} qui est l'inconnue du problème de force portante. Or, p_{lim} dépend de δ° : la résolution du problème, dans le cas général d'un sol ayant à la fois du frottement et de la cohésion et supportant une charge inclinée, ne pourra se faire que par approximations successives comme on le verra dans le chapitre 8.

Par exemple, dans le cas d'une fondation exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol en pente (Section 8-3), la pression limite s'exprime par :

$$(12) \quad P_{\text{lim}} = cr_{\text{cq}} N_{c\beta\delta} + \gamma D \cos \beta r_{\text{cq}} N_{q\beta\delta} + \frac{1}{2} \gamma B r_{\gamma} N_{\gamma\beta\delta}.$$

On voit que les trois termes de la formule (11) sont multipliés respectivement par r_{cq} , $r_{\text{cq}} \cos \beta$ et r_{γ} : ces trois facteurs dépendent des paramètres du problème (excentricité et inclinaison de la charge, pente du terrain, angle de frottement interne du sol).

On voit également que les trois coefficients N_c , N_q , N_{γ} sont affectés des indices β et δ qui indiquent que ces coefficients dépendent non seulement de ϕ (seul paramètre de N_c , N_q et N_{γ}) mais aussi de β (pente du terrain) et δ (inclinaison de la charge).

La liste de tous les coefficients N_c , N_q , N_{γ} , relatifs aux différentes sections, avec leurs indices, se trouve au début de l'ouvrage à la p. XXIV.

2b. Signification des termes de la formule

La forme additive de la formule (11) provient de l'emploi, pour l'établir, du principe de superposition. L'intérêt de cette façon de procéder a été discuté dans l'avant-propos. Voyons ici la signification de chacun des trois termes :

— Terme de cohésion : cN_c

Ce terme est le plus simple des trois. Il suffit de savoir que la cohésion, c , est celle du sol situé sous le niveau de la base de la fondation, sur une épaisseur H définie au début de la section 7-1.

— Terme de surcharge : γDN_q

Il est très important de savoir que γD est en fait la contrainte verticale, σ_z , au niveau de la base de la fondation, due au poids des terres sus-jacentes.

Par conséquent :

- la valeur du poids volumique γ à utiliser pour calculer γD est celle du sol de la couche d'épaisseur D ;
- si la surface du sol supporte une surcharge, p_0 , celle-ci est à ajouter à γD et la formule devient (voir Fig. 4) :

$$(13) \quad P_{\text{lim}} = cN_c + (\gamma D + p_0) N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma}.$$

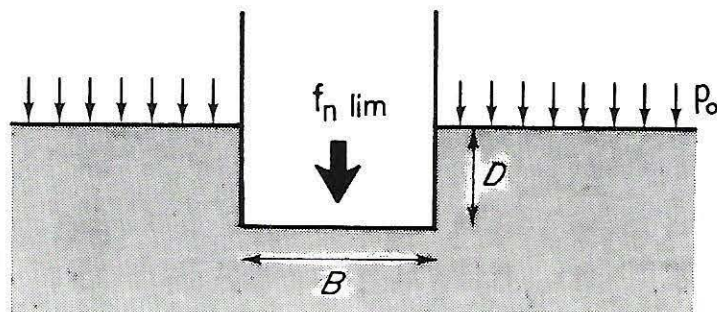


FIG. 4. — Cas d'un sol supportant une surcharge uniformément répartie, p_0 .

Cette addition d'une surcharge p_0 est possible de la même façon dans tous les cas envisagés dans ce volume.

— Terme de surface (ou de pesanteur) : $\frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$

Il faut savoir que le poids volumique, γ , qui intervient ici est celui du sol situé sous le niveau de la base de la fondation, sur une épaisseur H définie au début de la section 7-1.

Enfin, dans chacun des trois termes, les propriétés du sol qui servent à calculer le coefficient N_c , N_q ou N_γ (avec tous ses indices) sont celles du sol situé sous le niveau de la fondation, sur l'épaisseur H définie au début de la section 7-1.

Exemple :

Considérons un sol dont les propriétés changent au niveau de la base de la fondation (Fig. 5) et qui supporte une surcharge p_0 à sa surface. Quel est le rôle des différents paramètres γ , c et ϕ dans le calcul des termes de la formule donnant la pression limite ?

— Terme de cohésion :

$$c_2 N_c(\phi_2).$$

— Terme de surcharge :

$$(\gamma_1 D + p_0) N_q(\phi_2)$$

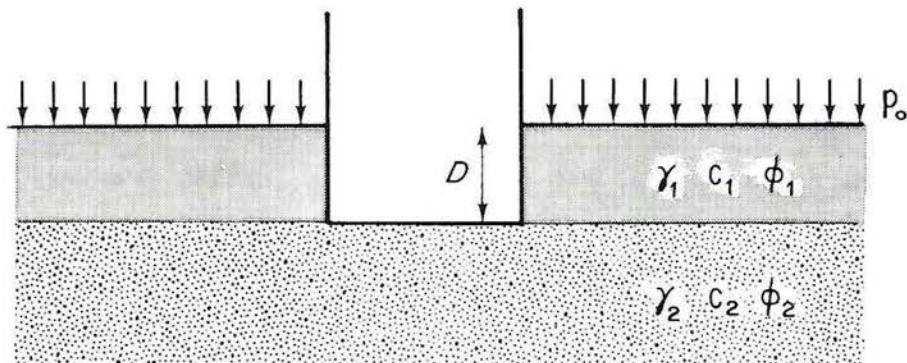


FIG. 5. — Sol dont les propriétés changent au niveau de la base de la fondation et supportant une surcharge p_0 à sa surface.

- Terme de surface :

$$\frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma}(\phi_2).$$

On voit que les propriétés mécaniques (c_1 , ϕ_1) de la couche d'épaisseur D n'interviennent pas. Seul son poids volumique intervient (dans le calcul de γD).

Il convient de souligner que l'on ne peut négliger les propriétés mécaniques de la couche d'épaisseur D que dans le cas des fondations superficielles (définies par D/B petit) seules considérées dans cet ouvrage. (Voir plus haut le § la sur la géométrie des fondations.)

3. DIVERS CAS DE CALCUL

Lorsque le sol est sec (ou partiellement saturé), le calcul de la pression limite est simple, comme nous le verrons plus loin (§ 3a). Par souci de simplicité nous dirons qu'il s'agit de la "pression limite sèche".

Lorsque le sol est situé sous la nappe phréatique (ou saturé par capillarité) il faut avant tout connaître sa perméabilité.

Si le sol est très peu perméable (argile), deux cas sont à considérer

- Pendant le chargement et immédiatement après, l'eau qui devrait s'échapper pour permettre la diminution de volume du sol sous la charge n'a pas eu le temps de quitter le sol. Tout se passe donc comme si le sol n'était pas drainé. On calcule alors la "pression limite non drainée"

- Au bout d'un certain temps, d'autant plus long que le sol est peu perméable, l'eau a pu s'échapper. On calcule alors la "*pression limite drainée*" (*).

Si, au contraire, le sol est très perméable (sable, gravier), l'eau se déplace très rapidement et l'on peut considérer que, même dans les instants suivant immédiatement le chargement, le drainage est effectif. Donc, pour les sols perméables, on ne calcule que la "*pression limite drainée*".

Ces deux pressions limites sont différentes car elles font intervenir des valeurs différentes de la cohésion, c , de l'angle de frottement, ϕ , et du poids volumique, γ , comme nous allons le voir dans la suite.

En résumé, trois types de calcul sont donc à envisager :

- pression limite sèche,
- pression limite drainée,
- pression limite non drainée.

3a. Pression limite sèche

C'est le cas le plus simple. Un essai drainé ou un essai non drainé donneront le même résultat : c et ϕ n'ont donc pas besoin d'être affectés d'un indice indiquant la nature de l'essai. Notons que pour qu'un sol se comporte ainsi il n'est pas nécessaire qu'il soit parfaitement sec. Il suffit que son degré de saturation soit inférieur à 0,6 ou 0,7 (autrement dit que 30 ou 40 % de son espace intergranulaire soit occupé par de l'air). Il peut également y avoir une nappe phréatique, pourvu qu'elle n'ait aucune influence sur le comportement de la fondation : il suffit pour cela qu'elle soit située à une profondeur H , au-dessous du niveau de la base de la fondation, supérieure à la valeur donnée au début de la section 7-1.

En ce qui concerne le poids volumique à employer dans la formule de la pression limite, il faut prendre le *poids volumique total*, γ (qui est égal au *poids volumique sec*, γ_d , si le sol est parfaitement sec).

(*) Dans le cas d'un sol peu perméable, on peut donc dire que la "*pression limite drainée*" est une "*pression limite à long terme*" et que la "*pression limite non drainée*" est une "*pression limite à court terme*" ou une "*pression limite instantanée*".

3b. Pression limite drainée

Dans ce cas il faut utiliser les propriétés mécaniques du sol mesurées dans un essai drainé : c' et ϕ' . L'eau ayant un comportement mécanique indépendant des grains du sol, elle n'agit que par la *poussée d'Archimède*, ce qui se traduit de la façon suivante :

- le poids volumique du sol à prendre en compte, au-dessous du niveau de la nappe, est le poids volumique immergé, γ' ;
- à la pression limite on doit ajouter un terme q_w représentant la poussée d'Archimède sur la fondation si elle est étanche et si, bien entendu, le niveau de la nappe est supérieur à celui de la base de la fondation (et s'il ne risque pas de baisser par la suite).

Compte tenu des remarques faites plus haut (§ 2b), concernant la signification des termes de la formule de Terzaghi, trois cas limites sont à considérer pour le poids volumique (Fig. 6) :

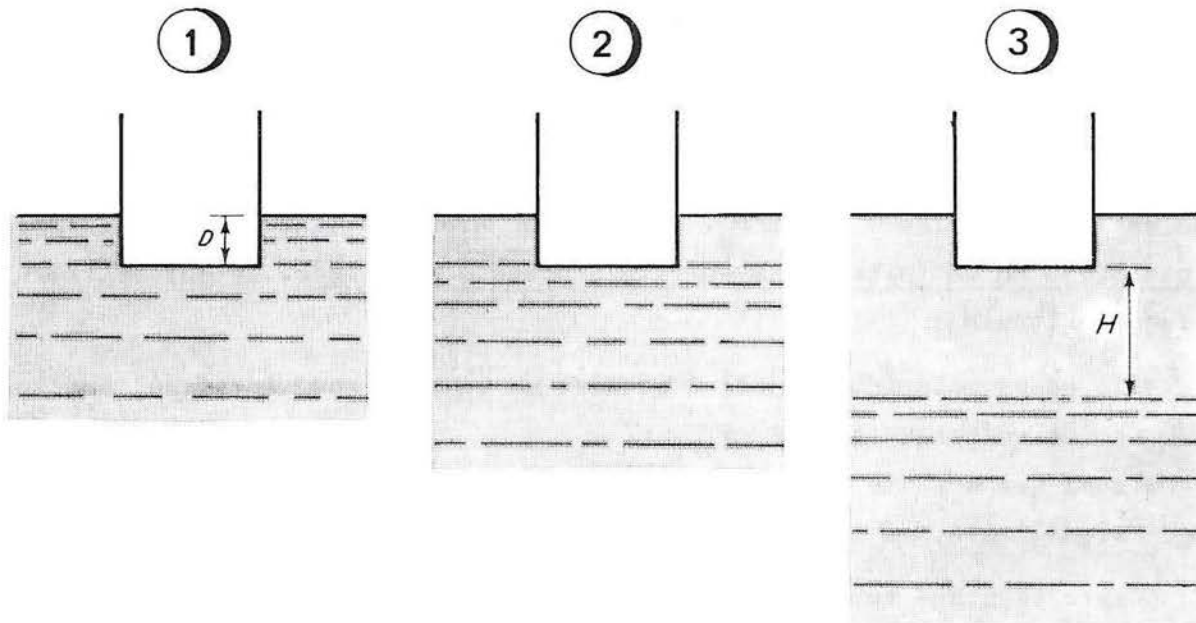


FIG. 6. — Trois cas typiques de niveau de la nappe phréatique :

- 1) en surface,
- 2) au niveau de la base de la fondation,
- 3) à une profondeur H telle que sa présence n'a aucune influence sur la pression limite.

- Cas 1 : nappe à la surface du sol

Il faut utiliser le *poids volumique immergé*, γ' , partout.

- Cas 2 : nappe au niveau de la base

Il faut utiliser le poids volumique immergé, γ' , pour le terme $0,5 \gamma_{BN}$ et le poids volumique total, γ , pour le terme γD (ce dernier γ valant γ_d si le sol au-dessus de la nappe est parfaitement sec, ce qui n'est le cas que pour les sols très perméables, les autres étant humides par capillarité).

- Cas 3 : nappe profonde

Dès que la profondeur de la nappe (mesurée à partir de la base de la fondation) excède la valeur H , donnée au début de la Section 7-1, deux cas sont à considérer : ou bien le sol au-dessus de la nappe est sec (ou partiellement saturé) et l'on se reporte au calcul de la "pression limite sèche", ou bien le sol est saturé par capillarité et alors il vaut mieux considérer, pour le calcul de la pression limite, que la nappe est au niveau atteint par la rétention capillaire (sans toutefois rajouter la poussée d'Archimède à la pression limite calculée).

Bien entendu, toute interpolation entre ces cas limites est possible.

3c. Pression limite non drainée

Dans ce cas, il faut utiliser les propriétés mécaniques du sol mesurées dans un essai non drainé : c_u et ϕ_u . L'eau étant alors solidaire des grains, il n'est pas question de faire intervenir la poussée d'Archimède, ce qui se traduit de la façon suivante :

- le poids volumique du sol à prendre en compte, sous la nappe, est le poids volumique saturé, γ_{sat} ;
- quel que soit le niveau de la nappe, il ne faut pas ajouter, à la pression limite, la poussée d'Archimède sur la fondation.

Compte tenu des remarques faites plus haut (§ 2b), concernant la signification des termes de la formule de Terzaghi, trois cas limites sont à considérer pour le poids volumique (Fig. 6) :

- Cas 1 : nappe à la surface du sol

Il faut utiliser le *poids volumique saturé*, γ_{sat} , partout.

- Cas 2 : nappe au niveau de la base

Il faut utiliser le *poïds volumique saturé*, γ_{sat} , pour le terme $0,5 \gamma_{\text{BN}} \gamma$ et le *poïds volumique total*, γ , pour le terme γD (ce dernier γ -valant γ_d si le sol au-dessus de la nappe est parfaitement sec, ce qui est rarement le cas pour les sols fins concernés par le calcul "non drainé" car ils sont humides, voire saturés, par capillarité).

- Cas 3 : nappe profonde

Dès que la profondeur de la nappe (mesurée à partir de la base de la fondation) excède la valeur H , donnée au début de la section 7-1, deux cas sont à considérer : ou bien le sol au-dessus de la nappe est sec (ou partiellement saturé) et l'on se reporte au calcul de la "pression limite sèche", ou bien le sol est saturé par capillarité et alors il vaut mieux considérer, pour le calcul de la pression limite, que la nappe est au niveau atteint par la rétention capillaire.

Bien entendu, toute interpolation entre ces cas limites est possible.

En conclusion de ce paragraphe 3 on notera qu'il existe une grande quantité de cas selon :

- la position de la nappe,
- le degré de saturation du sol,
- la perméabilité du sol,
- le moment où l'on désire calculer la pression limite : immédiatement après la fin de la construction (*court terme*) ou très longtemps après (*long terme*).

Toutefois, les diverses combinaisons de ces paramètres ne conduisent qu'à trois types de calcul :

- pression limite sèche,
- pression limite drainée,
- pression limite non drainée.

Le tableau suivant récapitule les diverses possibilités.

SOL INTERVENANT DANS LA STABILITE
DE LA FONDATION (3)

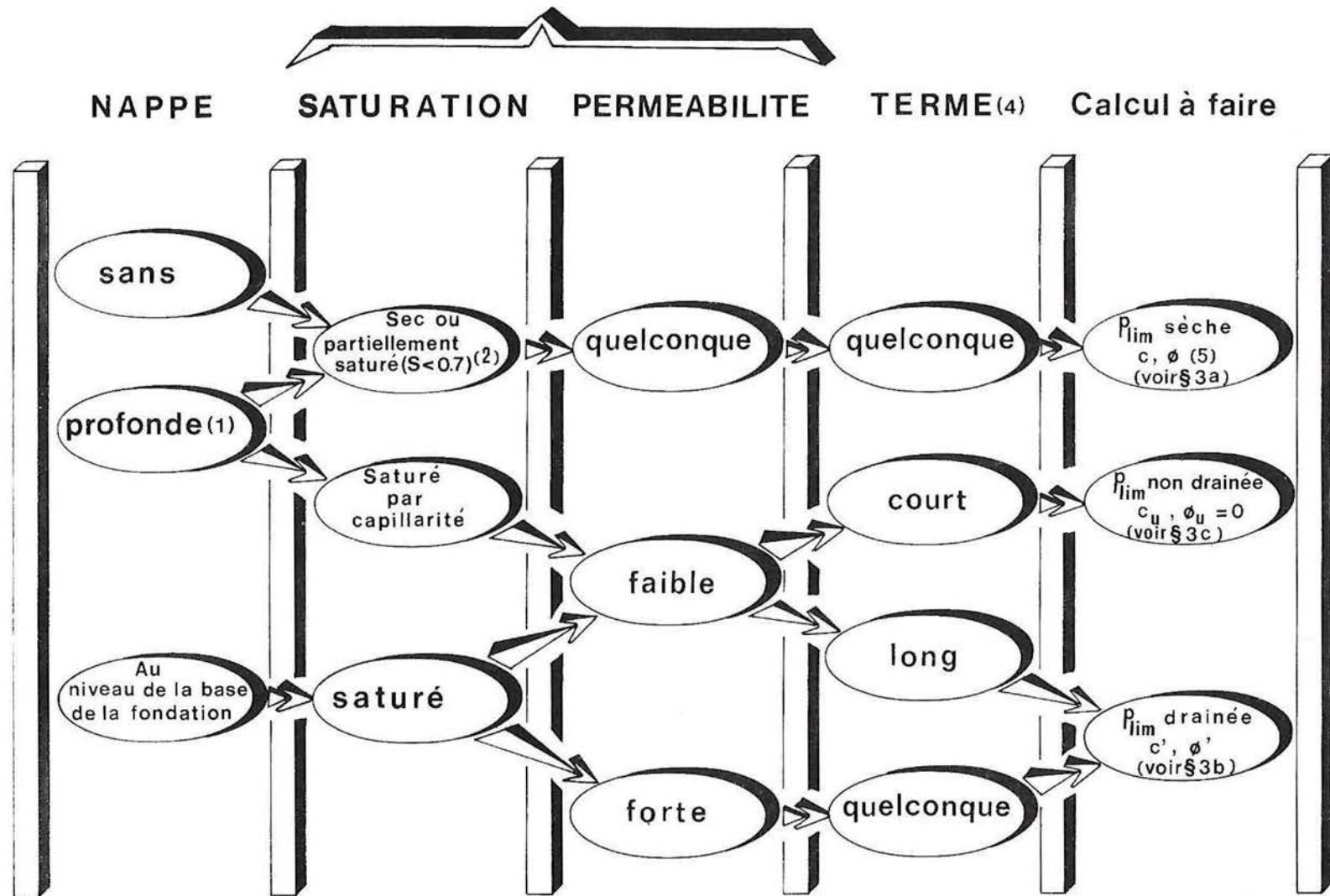


Tableau récapitulatif des divers cas de calcul. (1) La nappe peut être considérée comme profonde lorsqu'elle est à une profondeur supérieure à la valeur H donnée au début de la section 7-1. (2) S est le degré de saturation du sol. (3) Le sol intervenant dans la stabilité de la fondation est celui situé à une profondeur inférieure à la valeur H indiquée ci-dessus. (4) "Court terme" veut dire immédiatement après la fin de la construction et "long terme" longtemps après. (5) Dans ce cas, les propriétés du sol mesurées dans un essai drainé ou non drainé sont identiques (l'essai étant fait, bien entendu, avec la teneur en eau naturelle du sol).

BIBLIOGRAPHIE SUR L'INFLUENCE DE LA FORME
DES FONDATIONS SUR LA PRESSION LIMITE

- [1] E.E. de BEER et B. LADANYI, "Etude expérimentale de la capacité portante du sable sous des fondations circulaires établies en surface", Comptes Rendus du 5^e Congrès International de Mécanique des Sols, 1 (Paris, 1961), 577-585.
- [2] E.E. de BEER, "Experimental Determination of the Shape Factors and the Bearing Capacity Factors of Sand", Géotechnique, 20, 4 (1970), 387-411.
- [3] A. CAQUOT et J. KERISEL, "Traité de Mécanique des Sols", Gauthier-Villars (Paris), 1956.
- [4] O.K. FROHLICH, "Discussion sur l'influence de la dimension et de la forme des fondations" Comptes Rendus du 5^e Congrès International de Mécanique des Sols, 3 (Paris, 1961), 192-193.
- [5] P. HABIB, "Discussion sur l'influence de la dimension et la forme des fondations", Comptes Rendus du 5^e Congrès International de Mécanique des Sols, 3 (Paris, 1961), 191-192.
- [6] J.B. HANSEN, "A general formula for bearing capacity", Danish Geotechnical Bulletin, 11 (1961), 38-46.
- [7] J.B. HANSEN, "A revised and extended formula for bearing capacity", Danish Geotechnical Bulletin, 28, (1970), 5-11.
- [8] A. KEZDI, "Bodenmechanik", 2, Verlag für Bauwesen (Berlin, 1964), 152-158.
- [9] R. L'HERMINIER, P. HABIB, Y. TCHENG et J. BERNEDE, "Fondations superficielles", Comptes Rendus du 5^e Congrès International de Mécanique des Sols, I, 3A/26 (Paris, 1961), 713-717.
- [10] H. MEISCHEIDER, "Einfluss der Flächenform auf die Tragfähigkeit", Bauingenieur (1940), 83.
- [11] G.G. MEYERHOF, "The Ultimate bearing capacity of foundations", Géotechnique, 2, 4 (Décembre 1951), 301-332.

- [12] G.G. MEYERHOF, "Discussion sur l'influence de la dimension et de la forme des fondations", Comptes Rendus du 5^e Congrès International de Mécanique des Sols, 3 (Paris, 1961), 191-192.
- [13] G.G. MEYERHOF, "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, 1, 1 (September 1963), 16-26.
- [14] A.W. SKEMPTON, "The bearing capacity of clays", Proc. Building Research Congress, 1 (London, 1951), 180.
- [15] G.F. SOWERS, "Shallow Foundations", Foundation Engineering, Leonards Editor, Chap. 6, Mc Graw-Hill (New York, 1962).
- [16] K. SZECHY, "Der Grundbau", 1, Springer-Verlag (Wien, 1963), 195-197.
- [17] K. TERZAGHI, "Mécanique théorique des Sols", Dunod (Paris, 1951), 131-132.
- [18] K. TERZAGHI et R.B. PECK, "Mécanique des Sols appliquée", Dunod (Paris, 1961), 176-177.

CHARGE NORMALE CENTRÉE

Fondation à base horizontale

- sol *homogène* horizontal Section 7-1
- sol horizontal *finement stratifié* Section 7-2
- sol horizontal *anisotrope* Section 7-3
- couche horizontale et d'*épaisseur finie* de sol homogène Section 7-4
- sol composé de *deux couches* Section 7-5
- sol horizontal dont la cohésion *varie avec la profondeur* Section 7-6
- sol horizontal contenant une *nappe phréatique* Section 7-7
- sol homogène *en pente* Section 7-8

Fondation à base oblique

- sol *homogène* horizontal Section 7-9

SECTION 7-1

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol homogène horizontal

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Table et Graphique
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

ϕ	H/B
0°	0,71
5°	0,79
10°	0,89
15°	1,01
20°	1,16
25°	1,35
30°	1,59
35°	1,90
40°	2,35
45°	3,00
50°	4,03

Le sol est limité supérieurement par un plan horizontal. Il est supposé homogène sur une épaisseur infinie. En pratique, si la couche de sol repose sur un substratum résistant, la distance H entre la base de la fondation et le substratum doit être suffisante pour que les lignes de glissement puissent se développer. En pratique, on retiendra pour H les valeurs minimales du tableau ci-contre, avec :

B : largeur de la fondation

ϕ : angle de frottement interne du sol.

Si la couche de sol qui supporte la fondation repose sur une couche moins dure, il faut que son épaisseur soit supérieure à 4 fois la largeur B de la fondation pour que tout se passe comme si le sol était homogène.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B (Fig. 1). Sa base, située à la profondeur D, est rigide. Elle exerce sur le sol une charge verticale et centrée dont la valeur limite (à la rupture) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite, ou pression portante, est donnée par :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(2) \quad p_{\text{lim}} = cN_c + \gamma DN_q + \frac{1}{2} \gamma BN_\gamma$$

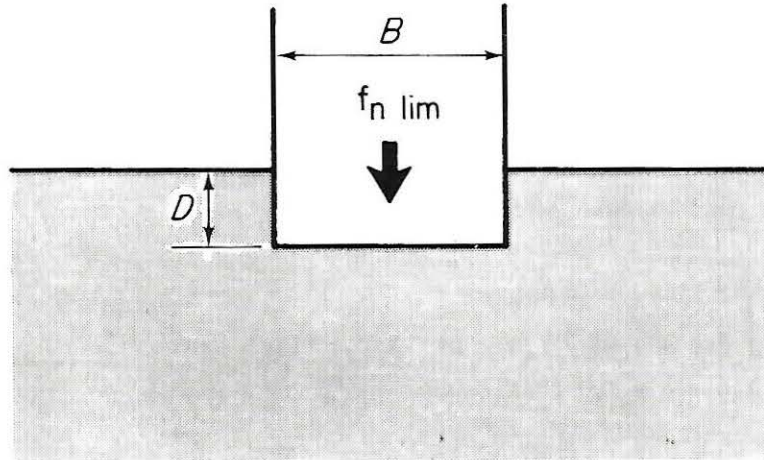


FIG. 1. — Définition du sol et de la fondation.

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

B : largeur de la fondation

D : profondeur de la base de la fondation

N_c, N_q, N_γ : coefficients sans dimensions dépendant uniquement de ϕ

ϕ : angle de frottement interne du sol.

Les valeurs numériques de N_c, N_q et N_γ sont données dans une table et un graphique. Dans le cas particulier où $\phi = 0$, on a :

$$N_c = 5,14 \quad N_q = 1 \quad N_\gamma = 0$$

et, par conséquent :

$$(3) \quad p_{lim} = 5,14 c + \gamma D.$$

Remarque sur la signification de γ (*) :

Dans le terme γD , γ représente le poids volumique du sol de la tranche d'épaisseur D .

Dans le terme $\frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$, γ représente le poids volumique du sol en dessous du niveau de la base de la fondation.

(*) Ceci n'est qu'un rappel des discussions faites dans l'introduction (§ 2b).

Exemple :

Considérons une fondation de 3 m (10 ft) de large et dont la base se trouve à la profondeur 1,8 m (6 ft). Le poids volumique du sol est 1,86 g/cm³ (116 lb/cu. ft). Ses propriétés mécaniques sont $\phi = 30^\circ$ et $c = 0,3$ bar (630 lb/sq. ft). Quelle pression limite peut exercer cette fondation sur le sol ?

En premier lieu, calculons :

$$\begin{aligned} \gamma_D &= 1\ 860 \times 9,81 \times 1,8 \times 10^{-5} = 0,33 \text{ bar} \\ &= 116 \times 6 = 700 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma_B &= \frac{1}{2} 1\ 860 \times 9,81 \times 3 \times 10^{-5} = 0,27 \text{ bar} \\ &= \frac{1}{2} 116 \times 10 = 580 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

On lit ensuite dans la table pour $\phi = 30^\circ$:

$$N_c = 30,14 \qquad N_q = 18,40 \qquad N_\gamma = 18,1.$$

La formule (2) donne alors :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 0,3 \times 30,14 + 0,33 \times 18,40 + 0,27 \times 18,1 = 20 \text{ bars} \\ &= 630 \times 30,14 + 700 \times 18,40 + 580 \times 18,1 = 42\ 000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

En divisant par un coefficient de sécurité (3, par exemple) on en déduit la pression admissible :

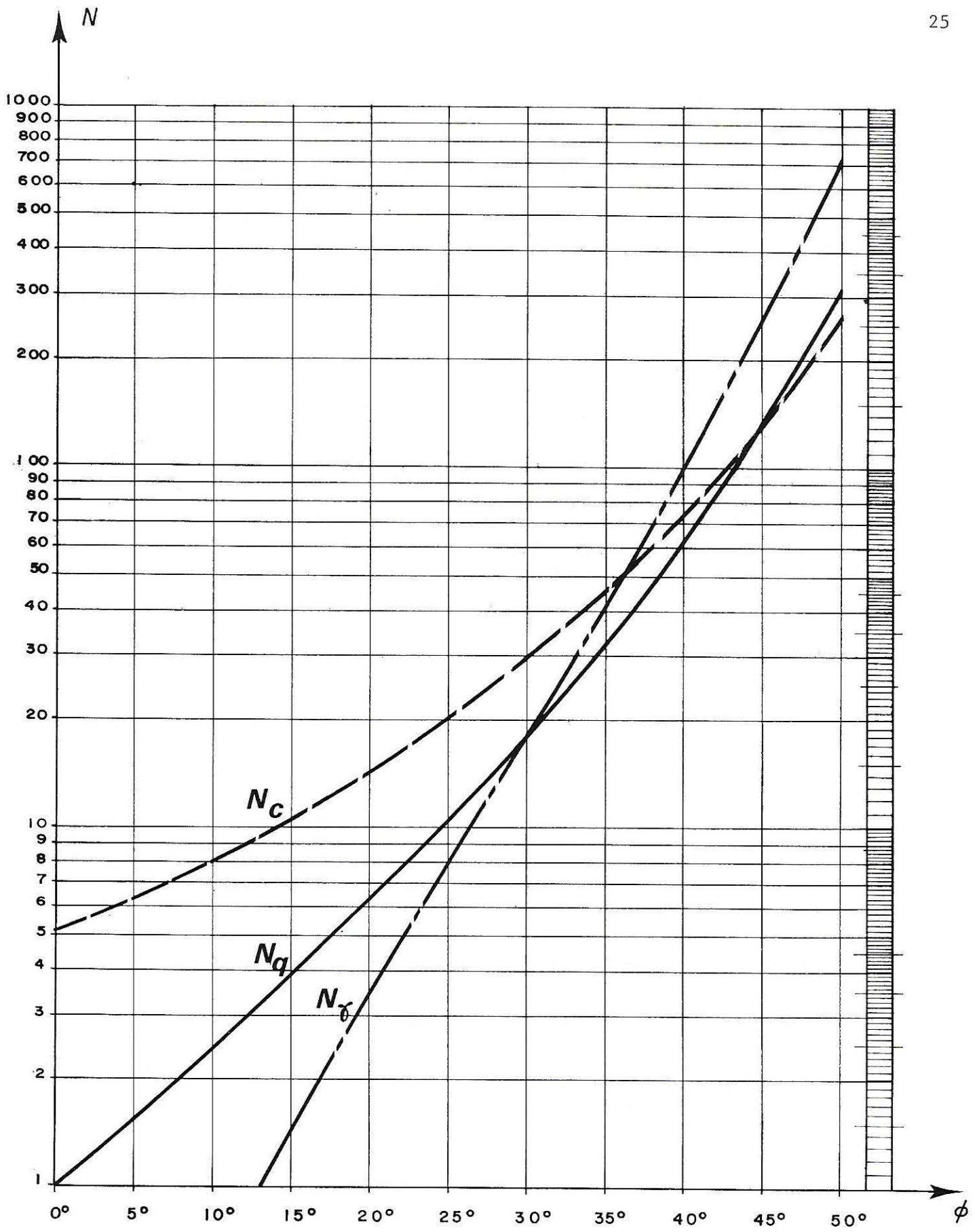
$$\begin{aligned} p_{adm} &= 20/3 = 6,7 \text{ bars} \\ &= 42\ 000/3 = 14\ 000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

TABLE ET GRAPHIQUE

N_c, N_q, N_γ p. 24-25.

Φ	N_c	N_q	N_γ
0°	5.14	1.00	0
1°	5.38	1.09	0.00
2°	5.63	1.20	0.01
3°	5.90	1.31	0.03
4°	6.19	1.43	0.05
5°	6.49	1.57	0.09
6°	6.81	1.72	0.14
7°	7.16	1.88	0.19
8°	7.53	2.06	0.27
9°	7.92	2.25	0.36
10°	8.34	2.47	0.47
11°	8.80	2.71	0.60
12°	9.28	2.97	0.76
13°	9.81	3.26	0.94
14°	10.37	3.59	1.16
15°	10.98	3.94	1.42
16°	11.63	4.34	1.72
17°	12.34	4.77	2.08
18°	13.10	5.26	2.49
19°	13.93	5.80	2.97
20°	14.83	6.40	3.54
21°	15.81	7.07	4.19
22°	16.88	7.82	4.96
23°	18.05	8.66	5.85
24°	19.32	9.60	6.89
25°	20.72	10.66	8.11
26°	22.25	11.85	9.53

Φ	N_c	N_q	N_γ
27°	23.94	13.20	11.2
28°	25.80	14.72	13.1
29°	27.86	16.44	15.4
30°	30.14	18.40	18.1
31°	32.67	20.63	21.2
32°	35.49	23.18	25.0
33°	38.64	26.09	29.4
34°	42.16	29.44	34.7
35°	46.12	33.30	41.1
36°	50.59	37.75	48.8
37°	55.63	42.92	58.2
38°	61.35	48.93	69.6
39°	67.87	55.96	83.4
40°	75.31	64.20	100
41°	83.86	73.90	120
42°	93.71	85.37	144
43°	105.1	99.01	173
44°	118.4	115.3	209
45°	133.9	134.9	254
46°	152.1	158.5	309
47°	173.6	187.2	379
48°	199.3	222.3	467
49°	229.9	265.5	578
50°	266.9	319.1	720
51°	311.8	386.0	900
52°	366.7	470.3	1140
53°	434.4	577.5	1450



EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\operatorname{tg} \phi}$$

$$N_q = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \exp(\pi \operatorname{tg} \phi)$$

N_γ : non analytique.

BIBLIOGRAPHIE

L'expression de la pression limite par la formule (2) est due à Terzaghi [5, 6]. L'expression des coefficients N_c et N_q a été donnée par Prandtl [4] et reprise par de nombreux auteurs tels que Caquot et Kerisel [3] et Brinch-Hansen [2]. Nous avons obtenu les valeurs numériques du coefficient N_γ par interpolation à partir des valeurs calculées pour 10° , 20° , 30° , 40° et 50° [7] à l'aide de l'hypothèse du coin minimal utilisée par certains auteurs, notamment Biarez [1]. Nous avons fait cette interpolation en supposant que N_γ était de la forme $(N_q - 1) \operatorname{tg} \phi f(\phi)$.

REFERENCES

- [1] J. BIAREZ, "Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents", Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Grenoble (1962).
- [2] J. BRINCH-HANSEN, "A general formula for bearing capacity", Bull. 8, Danish Geoteknisk Inst (Copenhagen, 1961).
- [3] A. CAQUOT et J. KERISEL, "Traité de Mécanique des Sols", Gauthier Villars, 4^e éd. (Paris, 1966).
- [4] L. PRANDTL, "Meber die Härte plastischer Körper", Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen (Berlin, 1920).

- [5] K. TERZAGHI, "Mécanique théorique des sols", Dunod (Paris, 1953).
- [6] K. TERZAGHI et R.B. PECK, "Mécanique des Sols appliquée", Dunod (Paris, 1961).
- [7] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble (1971).

SECTION 7-2

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol horizontal finement stratifié

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est constitué de fines couches parallèles d'un matériau de propriétés c^- et ϕ^- , alternant avec des couches beaucoup plus épaisses d'un matériau caractérisé par c et ϕ , avec :

$$c^- \ll c \quad \text{et} \quad \phi^- \ll \phi.$$

Il faut, de plus, pour la validité de l'étude théorique, que dans une épaisseur de sol égale à B (largeur de la fondation). Le nombre de couches (c^- , ϕ^-) soit grand, autrement dit que *l'épaisseur des couches (c , ϕ) soit petite vis-à-vis de B , tout en restant grande vis-à-vis de celle des couches (c^- , ϕ^-)* (Fig. 1).

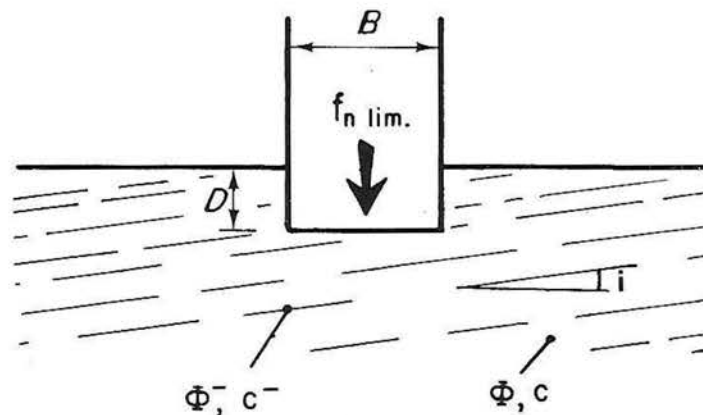


FIG. 1. — Définition de la fondation.

Les résultats donnés ici sont limités au cas où les propriétés des deux matériaux sont liées par :

$$(1) \quad c \cotg \phi = c^- \cotg \phi^-.$$

Si cette relation n'est pas vérifiée, on peut calculer la pression limite de la fondation pour deux sols fictifs qui la respectent et dont les propriétés mécaniques sont respectivement supérieures et inférieures à celles du sol réel. On obtient ainsi une *majorante* et une *minorante* de la pression limite cherchée.

Enfin, la formule (3) donnant la pression limite est valable pour toute inclinaison i des couches inférieure à la valeur i_{\max} donnée par la fig. 2. Pour les valeurs de i supérieures à i_{\max} , on ne peut rien dire sans une discussion très détaillée.

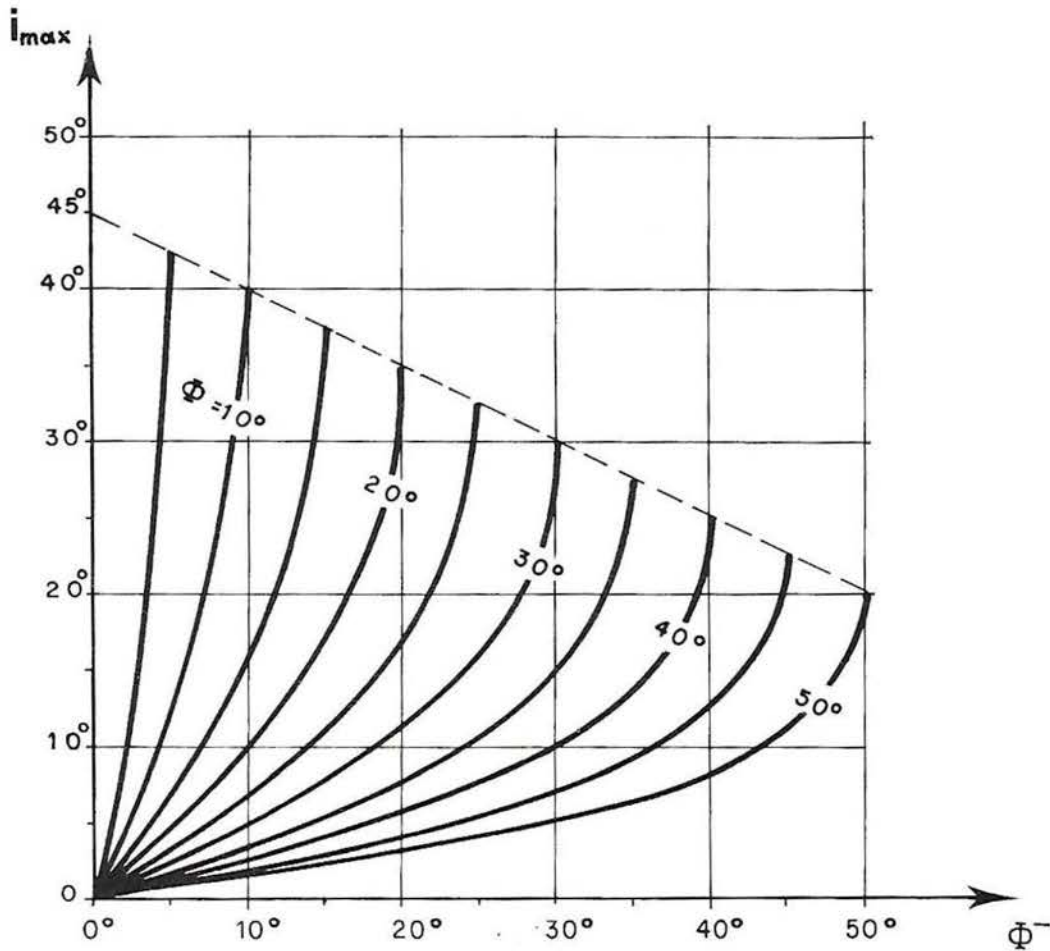


FIG. 2. — Valeur maximale de l'inclinaison i des couches en fonction de ϕ et ϕ^- , pour que la formule (3) soit valable.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B . Sa base horizontale, située à la profondeur D , est rigide et rugueuse (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge verticale et centrée dont la valeur limite (à la rupture) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite moyenne, ou pression portante, est donnée par :

$$(2) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(3) \quad p_{\text{lim}} = cN_c^- + \gamma DN_q^- + \frac{1}{2} \gamma DN_\gamma^-$$

avec :

c : cohésion du sol des couches épaisses

γ : poids volumique moyen du sol

B : largeur de la fondation

D : profondeur de la base de la fondation

N_c^- , N_q^- et N_γ^- : coefficients sans dimensions dépendant de ϕ et ϕ^-

ϕ , ϕ^- : angle de frottement interne du sol, respectivement dans les couches épaisses et dans les couches minces.

— Cas particulier : $\phi = \phi^- = 0$.

On a alors :

$$N_c^- = N_c^0 \quad N_q^- = 1 \quad \text{et} \quad N_\gamma^- = 0$$

et, par conséquent :

$$(4) \quad p_{\text{lim}} = cN_c^0 + \gamma D.$$

Les valeurs numériques des coefficients N_c^0 , N_c^- , N_q^- et N_γ^- sont données dans des tables et graphiques.

Signalons enfin que, si ϕ n'est pas nul, un calcul approché rapide peut être fait à l'aide de la formule suivante :

$$(5) \quad p_{\text{lim}} = \lambda (p_{\text{lim}} \text{ relative au sol homogène}).$$

Le coefficient λ ne dépend que de la différence $\phi - \phi^-$ et sa valeur est donnée par un graphique.

Exemple :

Considérons une fondation de 3 m (10 ft) de large et dont la base se trouve à la profondeur 1,8 m (6 ft). Le poids volumique moyen du sol est 1,86 g/cm³ (116 lb/cu. ft). Ses propriétés mécaniques sont $\phi^- = 15^\circ$ et $c^- = 0,14$ bar (290 lb/sq. ft) dans les fines couches et $\phi = 30^\circ$ et $c = 0,3$ bar (630 lb/sq. ft) ailleurs. Quelle pression limite peut exercer cette fondation sur ce sol ?

En premier lieu calculons :

$$\begin{aligned} \gamma D &= 1\,860 \times 9,81 \times 1,8 \times 10^{-5} = 0,33 \text{ bar} \\ &= 116 \times 6 = 700 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= \frac{1}{2} 1\ 860 \times 9,81 \times 3 \times 10^{-5} = 0,27 \text{ bar} \\ &= \frac{1}{2} 116 \times 10 = 580 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Ensuite, on peut faire un premier calcul approché de la pression limite à l'aide de la formule (5). Pour cela, calculons d'abord la pression limite avec un sol homogène $c = 0,3$ bar et $\phi = 30^\circ$. Les valeurs numériques des coefficients N_c , N_q et N_γ se trouvent soit dans la table donnée dans la section relative au sol homogène (*) soit dans les tables de N_c^- , N_q^- et N_γ^- donnés ici avec $\phi^- = \phi$. On lit :

$$N_c = 30,14 \quad N_q = 18,40 \quad \text{et } N_\gamma = 18,1.$$

Le calcul de la pression limite donne alors :

$$\begin{aligned} P_{\text{lim}} &= 0,3 \times 30,14 + 0,33 \times 18,40 + 0,27 \times 18,1 = 20 \text{ bars} \\ &= 630 \times 30,14 + 700 \times 18,40 + 580 \times 18,1 = 42\ 000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Cette valeur est à multiplier, d'après la formule (5), par $\lambda = 0,7$ lu dans le graphique pour $\phi - \phi^- = 30^\circ - 15^\circ = 15^\circ$. La valeur approchée de la pression limite du sol stratifié est alors

$$\begin{aligned} P_{\text{lim}} &= 0,7 \times 20 = 14 \text{ bars} \\ &= 0,7 \times 42\ 000 = 29\ 000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Faisons ensuite le calcul exact à l'aide de la formule (3). Les coefficients lus dans les tables pour $\phi = 30^\circ$ et $\phi^- = 15^\circ$ valent :

$$N_c^- = 23,49 \quad N_q^- = 14,56 \quad \text{et } N_\gamma^- = 14,1.$$

D'où la valeur de la pression limite :

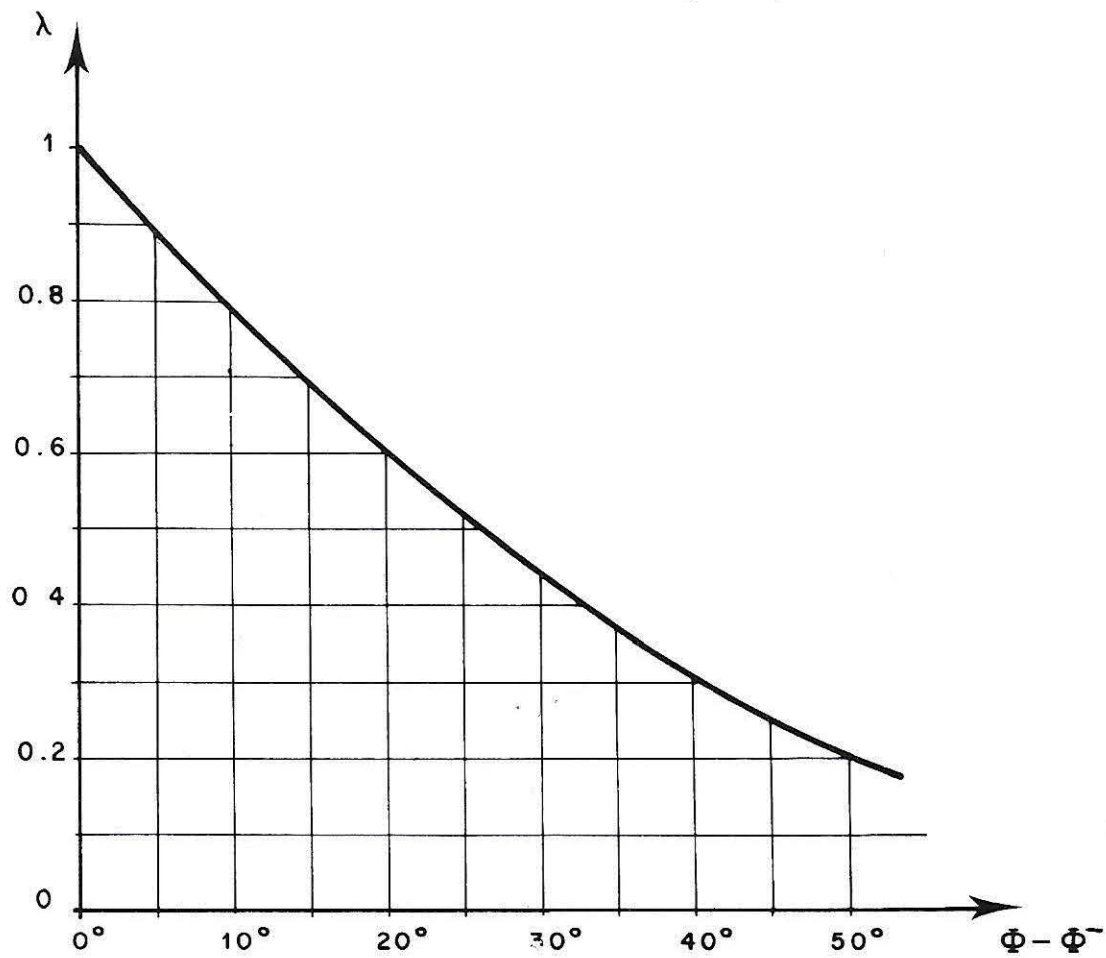
$$\begin{aligned} P_{\text{lim}} &= 0,3 \times 23,49 + 0,33 \times 14,56 + 0,27 \times 14,1 = 15,6 \text{ bars} \\ &= 630 \times 23,49 + 700 \times 14,56 + 580 \times 14,1 = 33\ 000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

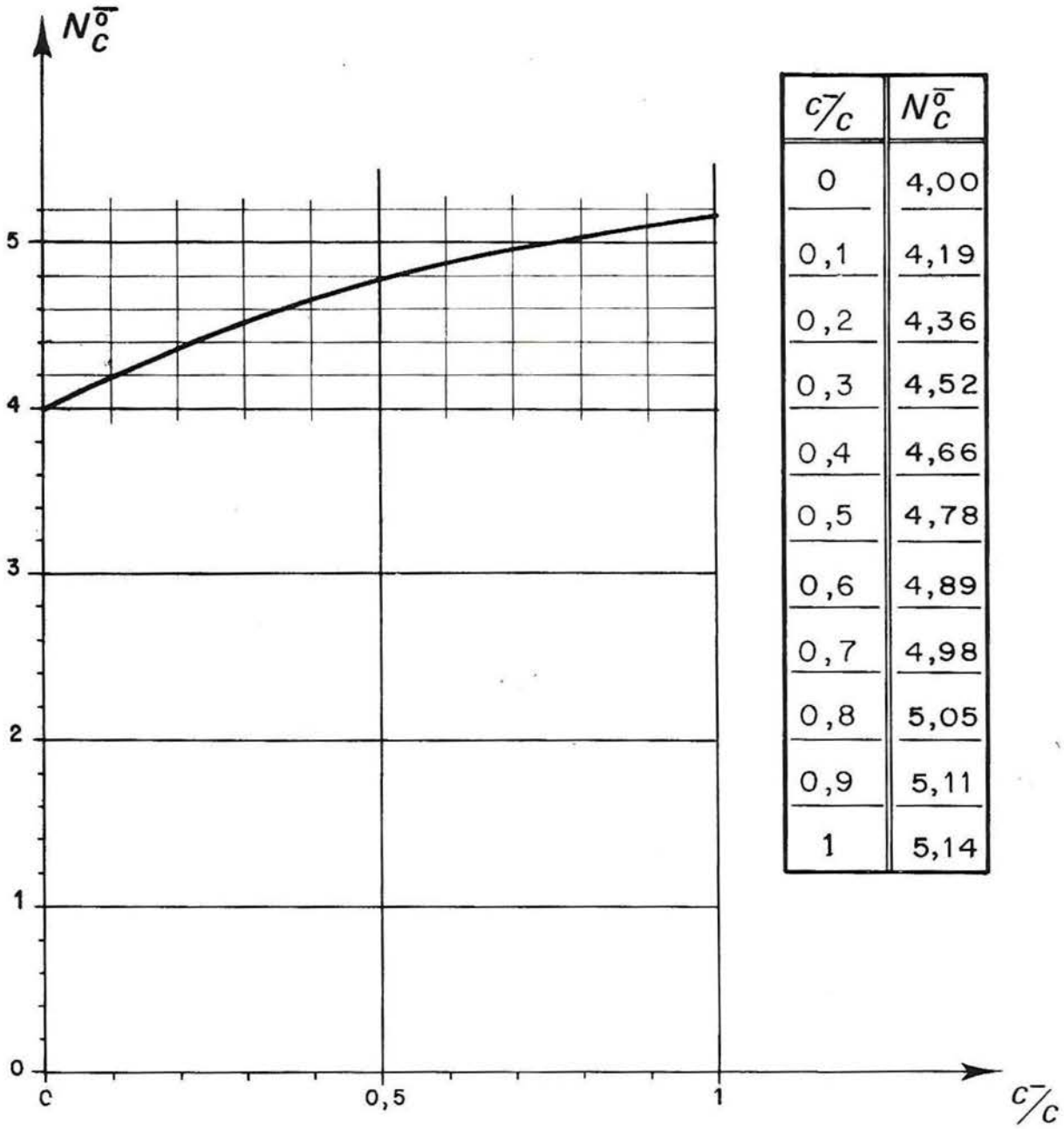
L'erreur de la formule approchée pour cet exemple est donc d'environ 10 % par défaut.

(*) Voir la Section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

TABLES ET GRAPHIQUES

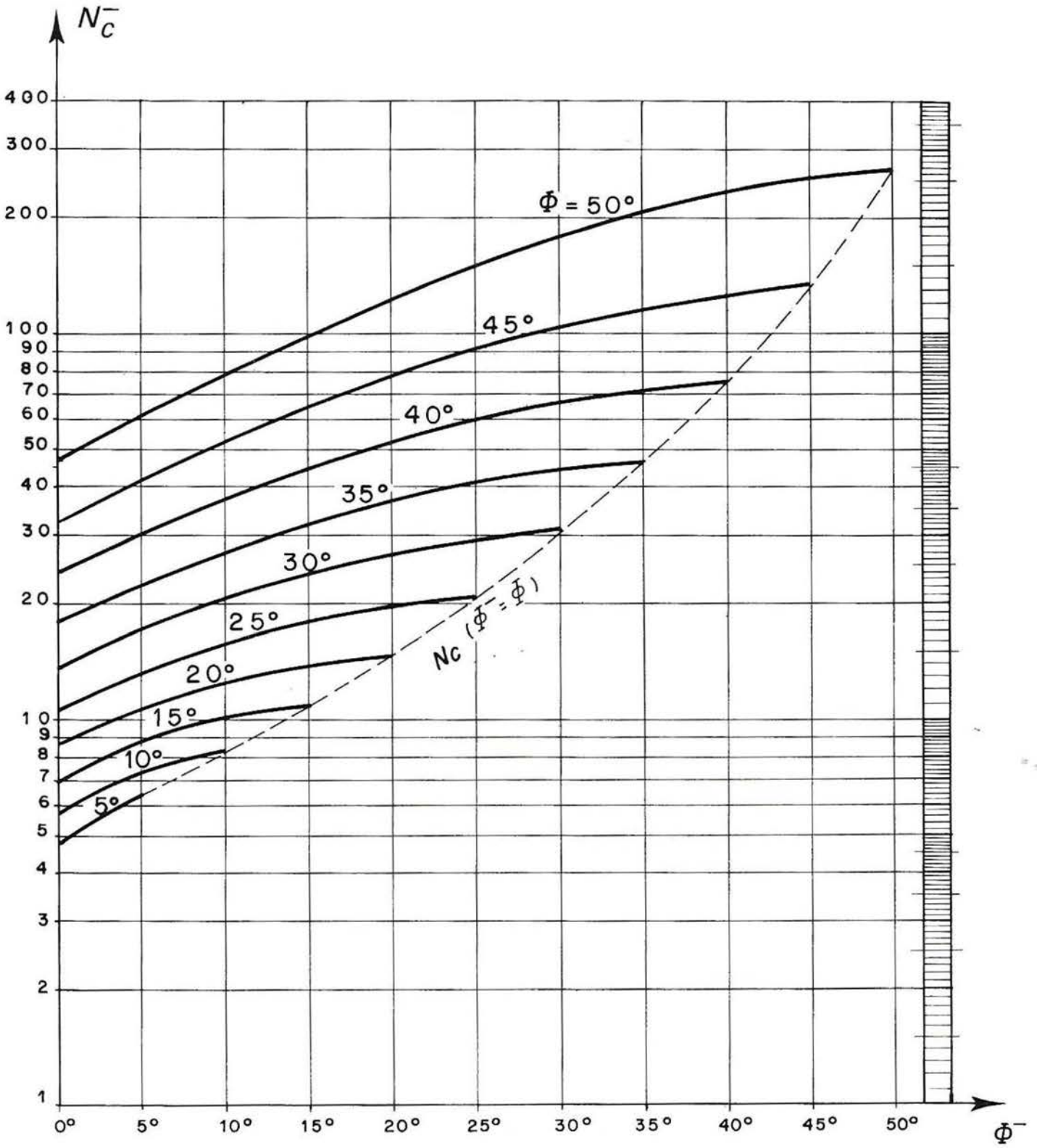
— Coefficient de réduction λ	p. 34
— Coefficient N_c^- (cas $\phi = \phi^- = 0$)	p. 35
— Coefficients N_c^- , N_q^- et N_γ^-	p. 36-41.





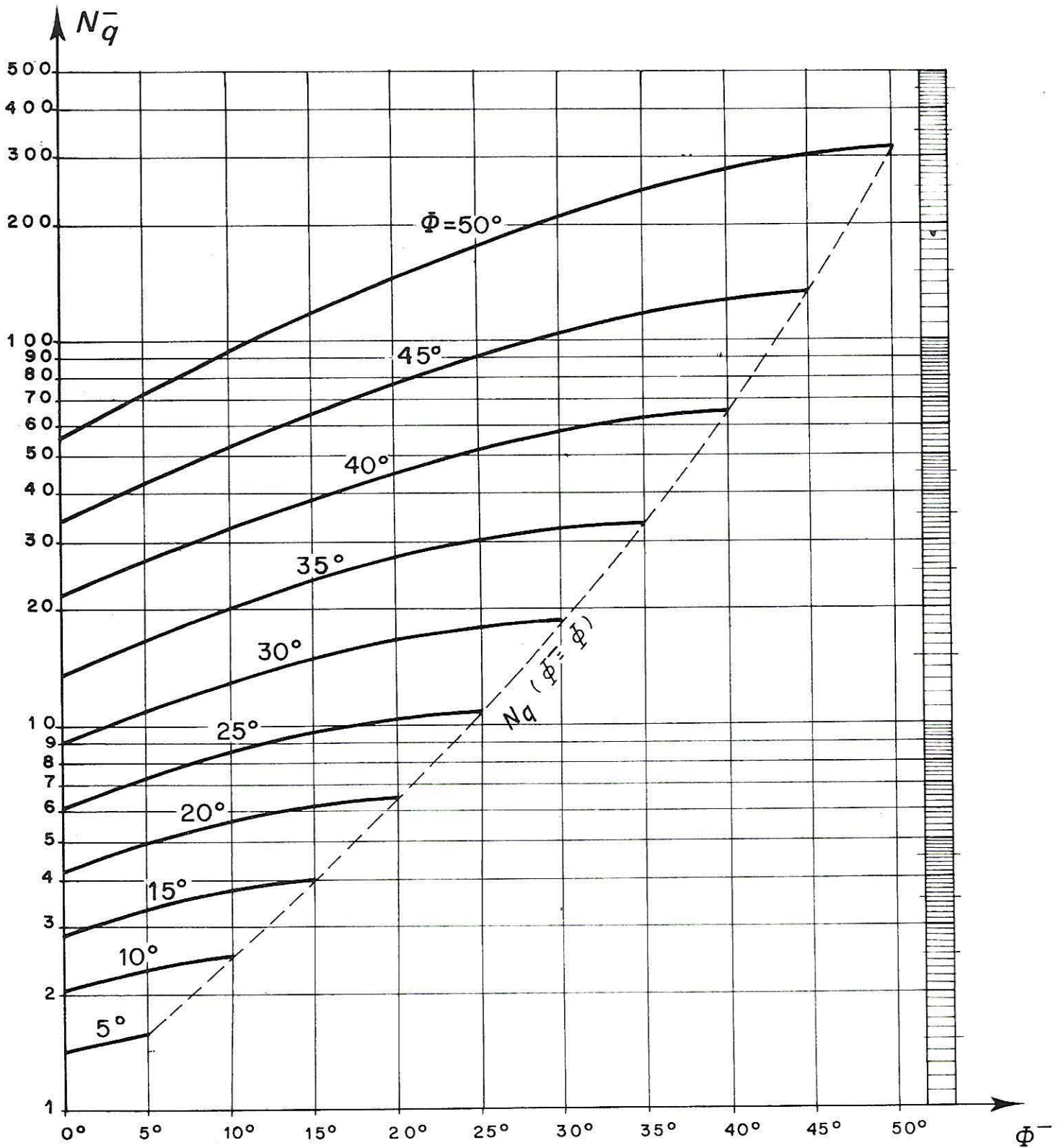
$\Phi \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°	0°
0°	46,97	32,97	24,01	18,02	13,86	10,87	8,68	7,03	5,77	4,78	N_{CO}^0
5°	61,28	42,03	30,10	22,33	17,06	13,37	10,73	8,82	7,47	6,49	
10°	78,37	52,41	36,82	26,91	20,32	15,78	12,56	10,22	8,34		
15°	98,36	64,05	44,04	31,61	23,49	17,96	14,02	10,98			
20°	121,2	76,72	51,54	36,24	26,40	19,73	14,83				
25°	146,5	90,10	59,02	40,53	28,79	20,72					
30°	173,8	103,6	66,03	44,09	30,14						
35°	202,0	116,5	71,91	46,12							
40°	229,3	127,5	75,31								
45°	252,9	133,9									
50°	266,9										

N_c



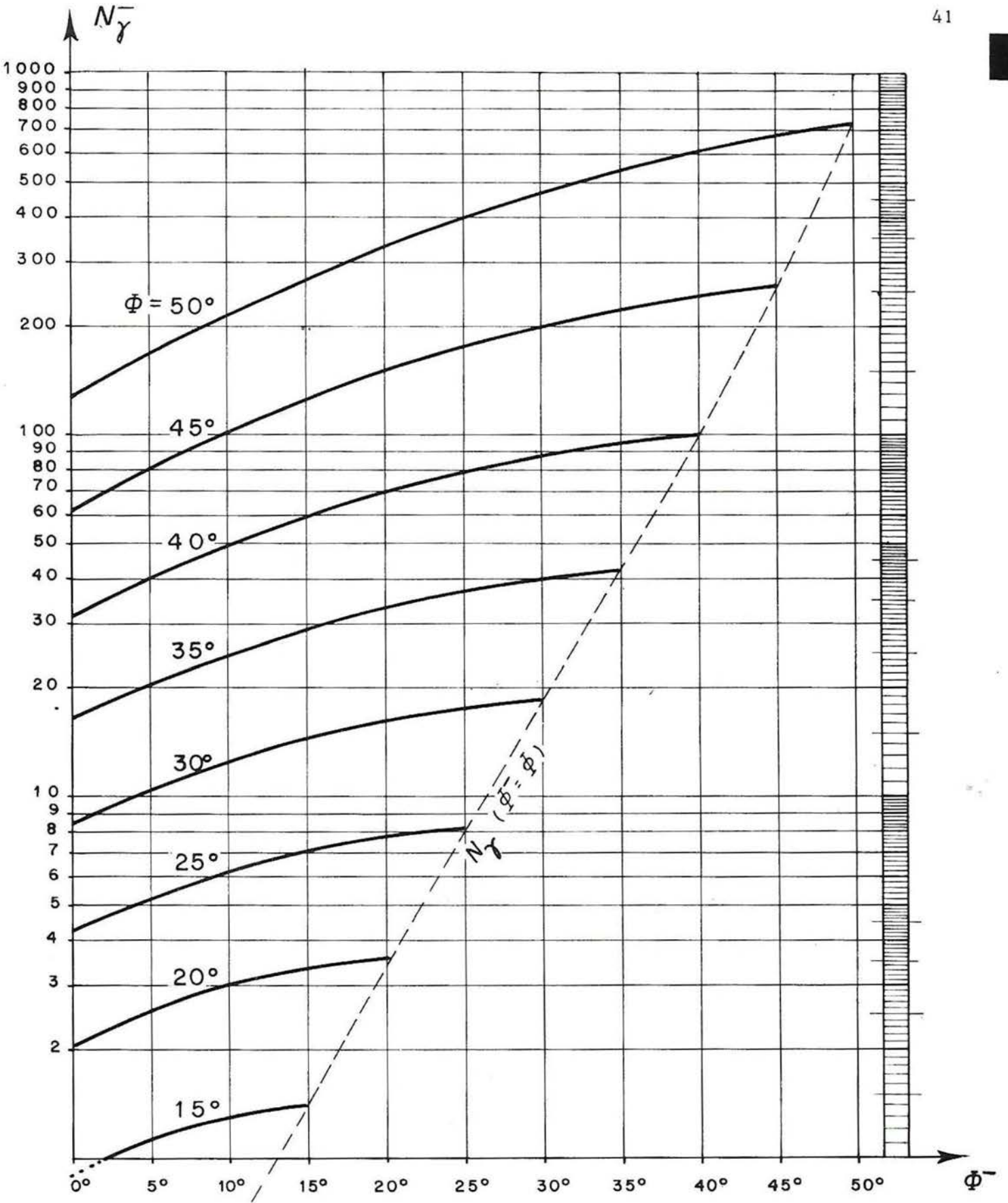
$\Phi \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°	0°
0°	56,98	33,97	21,15	13,62	9,00	6,07	4,16	2,89	2,02	1,42	1,00
5°	74,04	43,03	26,26	16,64	10,85	7,24	4,91	3,36	2,32	1,57	
10°	94,40	53,41	31,90	19,84	12,73	8,36	5,57	3,74	2,47		
15°	118,2	65,05	37,95	23,14	14,56	9,37	6,11	3,94			
20°	145,4	77,73	44,25	26,38	16,24	10,20	6,40				
25°	175,7	91,10	50,52	29,38	17,62	10,66					
30°	208,2	104,7	56,41	31,87	18,40						
35°	241,7	117,5	61,34	33,30							
40°	274,3	128,5	64,20								
45°	302,4	134,9									
50°	319,1										

N_q



ϕ / ϕ	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°	0°
0°	127	62.5	31.9	16.1	8.31	4.26	2.07	0.90	0.32	0.07	0
5°	165	79.7	40.0	19.9	10.2	5.23	2.56	1.13	0.41	0.09	
10°	211	99.3	48.9	24.0	12.2	6.18	3.00	1.31	0.47		
15°	265	121	58.5	28.2	14.1	7.03	3.34	1.42			
20°	327	145	68.4	32.3	15.8	7.72	3.54				
25°	395	171	78.4	36.1	17.3	8.11					
30°	469	196	87.7	39.3	18.1						
35°	545	221	95.5	41.1							
40°	619	242	100								
45°	682	254									
50°	720										

N_j



EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$$N_c^- = \frac{N_q^- - 1}{\text{tg } \phi}$$

$$N_q^- = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \frac{\sin(\gamma + \phi^-)}{\sin(\gamma - \phi^-)} \exp(2 \gamma \text{tg } \phi)$$

$$\text{avec } \gamma = \text{Arc sin} \left(\frac{\sin \phi^-}{\sin \phi} \right)$$

N_γ^- : Non explicite

$$N_c^- = 2 \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{c^-}{c} \right)^2} + \text{Arc sin} \frac{c^-}{c} \right)$$

BIBLIOGRAPHIE

Les résultats indiqués dans cette section sont le fruit de travaux que nous avons réalisés à la suite de Sokolovski [5] et qui ont déjà fait l'objet de plusieurs publications [1, 2, 3, 4] .

REFERENCES

- [1] J. BIAREZ et J.P. GIROUD, "Equilibre limite d'un massif de sol stratifié", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 259, gr. 2 (16 Nov. 1964), 3437-3440.
- [2] J.P. GIROUD, "Etude statique en plasticité parfaite à deux dimensions d'un massif semi-infini de sol stratifié non pesant limité par des plans supportant une surcharge uniforme", Thèse de Doctorat de Spécialité, Faculté des Sciences de Grenoble (Juillet 1963).
- [3] J.P. GIROUD, "Stabilité d'une fondation de barrage comprenant de fines couches d'argile", Comptes Rendus du 2^e Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches, 3, 8-6 (Belgrade, Septembre 1970), 441-445.
- [4] J.P. GIROUD, "Bearing capacity of footings on a stratified soil", Proc. 4th Conference on Soil Mechanics (Budapest, 12-15 October 1971), 551-558.
- [5] V.V. SOKOLOVSKI, "Statics of soil media" Butterworth (London, 1956).

SECTION 7-3

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol horizontal anisotrope

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Table et Graphique
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est limité supérieurement par un plan horizontal. Il est supposé homogène sur une épaisseur infinie et anisotrope. Son angle de frottement interne est nul et sa cohésion est caractérisée par trois valeurs : c_{uv} , c_{u45} et c_{uh} mesurées par des essais de compression simple, non drainés, effectués suivant des directions respectivement verticale, à 45° et horizontale.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur B constante (Fig. 1). Sa base, située à la profondeur D , est rigide. Elle exerce sur le sol une charge verticale et centrée dont la valeur limite (à la rupture) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite, ou pression portante, est donnée par :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

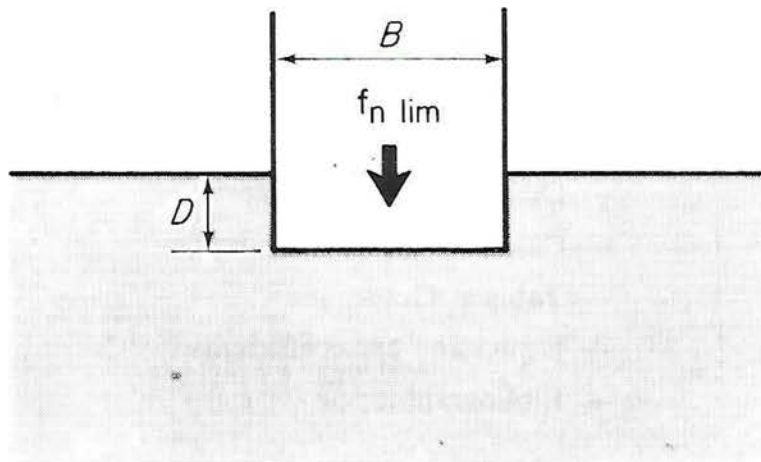


FIG. 1. - Définition de la fondation.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

Le calcul n'est possible que dans le cas où l'angle de frottement est nul ($\phi = 0$). La pression limite est alors donnée par :

$$(2) \quad p_{\text{lim}} = \frac{c_{uv} + c_{uh}}{2} N_c^* + \gamma D$$

avec :

c_{uv} , c_{uh} : cohésions du sol mesurées par un essai non drainé de compression simple respectivement dans le sens vertical et dans le sens horizontal (sol saturé pour avoir $\phi = 0$).

γ : poids volumique du sol dans la couche supérieure d'épaisseur D

D : profondeur de la base de la fondation

N_c^{*0} : coefficient sans dimensions dont les valeurs numériques sont données dans une table et un graphique en fonction de α .

$$\alpha = \frac{c_{u\ 45}}{\sqrt{c_{uv} c_{uh}}}$$

$c_{u\ 45}$: cohésion mesurée par un essai non drainé de compression simple effectué suivant une direction à 45° .

Exemple :

Considérons l'argile ayant fait l'objet des expériences de Boehler [1]. Sa cohésion, mesurée dans trois directions différentes, a pour valeur :

direction verticale : $c_{uv} = 1,66$ bar (3 470 lb/sq. ft)

direction à 45° : $c_{u\ 45} = 1,38$ bar (2 880 lb/sq. ft)

direction horizontale : $c_{uh} = 1,20$ bar (2 500 lb/sq. ft).

Quelle serait la force portante d'une fondation posée, sans être enfoncée, sur ce sol ?

Calculons d'abord :

$$\alpha = \frac{1,38}{\sqrt{1,66 \times 1,20}} = \frac{2\ 880}{\sqrt{3\ 470 \times 2\ 500}} = 0,98.$$

Par lecture sur le graphique ou interpolation dans la table on en déduit :

$$N_c^{*0} = 5,11.$$

Appliquons ensuite la formule (2) avec $D = 0$ puisque la fondation n'est pas enfoncée :

$$P_{lim} = \frac{1,66 + 1,20}{2} \times 5,11 = 7,3 \text{ bars}$$

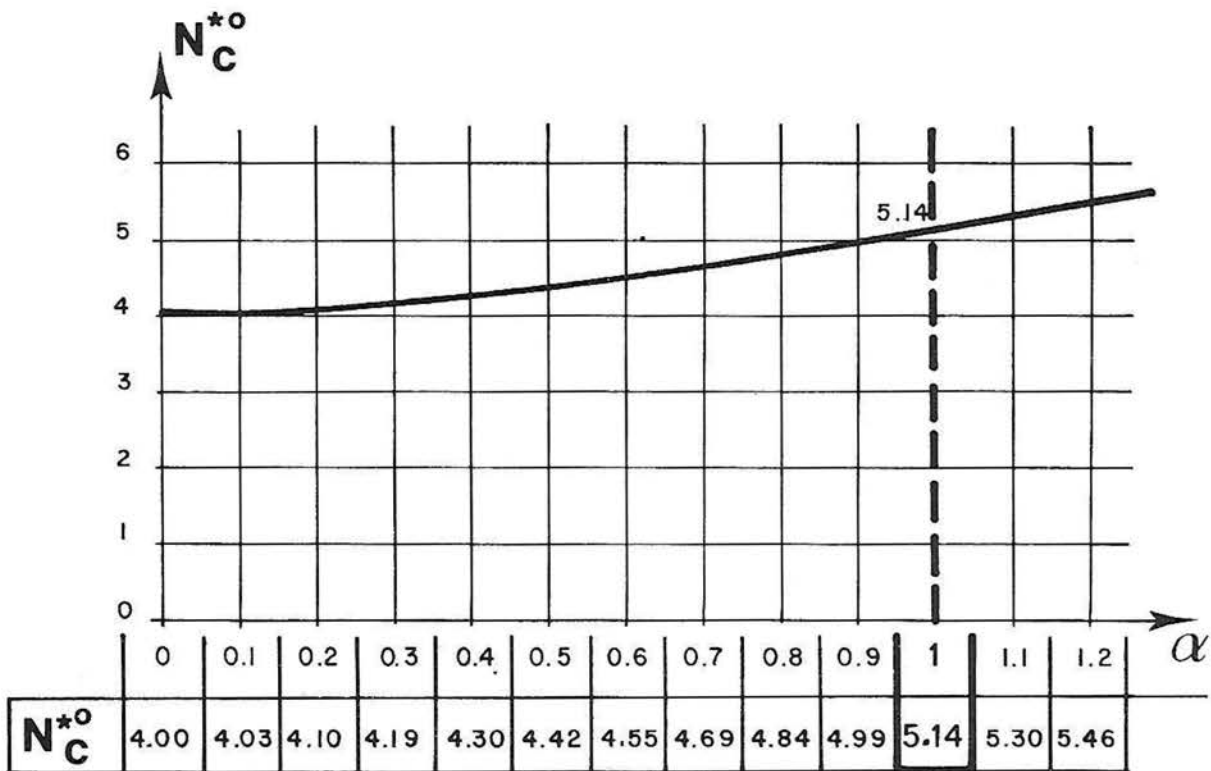
$$P_{lim} = \frac{3\ 470 + 2\ 500}{2} \times 5,11 = 15\ 300 \text{ lb/sq. ft.}$$

En suivant la pratique traditionnelle, qui consiste à faire une seule mesure dans le sens vertical et à considérer le sol comme isotrope, on aurait eu :

$$P_{lim} = 1,66 \times 5,14 = 8,5 \text{ bars}$$

$$P_{lim} = 3\ 470 \times 5,14 = 17\ 750 \text{ lb/sq. ft.}$$

TABLE ET GRAPHIQUE

EXPRESSION DU COEFFICIENT

$$N_C^{*0} = 2 + 2 \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - (1 - \alpha^2) \sin^2 x} \, dx$$

BIBLIOGRAPHIE

L'expression du coefficient N_C^{*0} a été obtenue par Davis et Christian [2] et nous les remercions de nous avoir autorisés à reproduire ce résultat. Une discussion détaillée de cette question se trouve dans la thèse d'Obin [3]. L'étude concernant l'argile de l'exemple a été publiée par Boehler et Giroud [1].

REFERENCES

- [1] J.P. BOEHLER and J.P. GIROUD, "Measurement of soils anisotropy", Ninth Annual Symposium on Engineering (Boise, Idaho, April 1971), 175-187.
- [2] E.H. DAVIS et J.T. CHRISTIAN, "Bearing Capacity of Anisotropic Cohesive Soil", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, SM5 (May 1971), 753-769.
- [3] J.P. OBIN, "Force portante en déformation plane d'un sol verticalement non homogène", Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Grenoble (Février 1972).

FONDATION A BASE HORIZONTALE EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE

(Semelle, Radier)
sur une couche horizontale et d'épaisseur finie de sol homogène

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol constitue une couche homogène d'épaisseur $H + D$, de cohésion c et d'angle de frottement interne ϕ , reposant sur un substratum indéformable (Fig. 1). Pour le contact entre le sol et le substratum, deux cas sont envisagés :

1. Frottement maximal : la contrainte tangentielle au contact sol-substratum est donnée par la loi de Coulomb avec c et ϕ .
2. Glissement sans frottement : la contrainte tangentielle au contact sol-substratum est nulle.

Le premier cas est probablement plus fréquent dans la nature. Le second convient lorsqu'un lit d'argile saturée sépare la couche de sol du substratum.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B . Sa base horizontale, située à la profondeur D , est rigide (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge verticale et centrée dont la valeur limite (à la rupture) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite moyenne, ou pression portante, est donnée par :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B}.$$

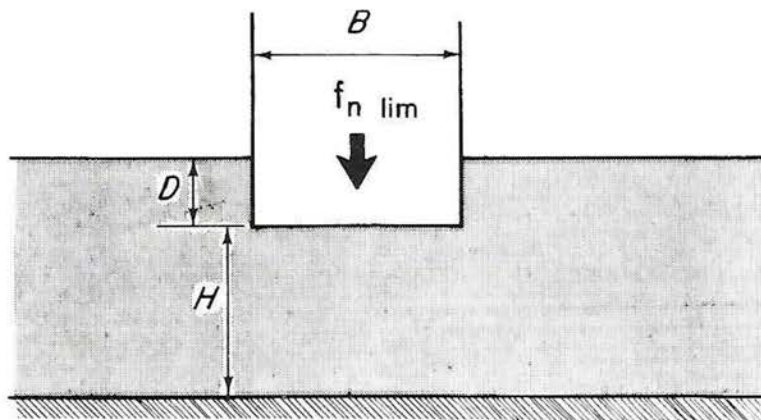


FIG. 1. — Définition du sol et de la fondation.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée, selon les cas, par l'une des deux formules suivantes :

- Frottement maximal à l'interface :

$$(2) \quad P_{\text{lim}} = c \xi_c N_c + \gamma D \xi_q N_q + \frac{1}{2} \gamma B \xi_\gamma N_\gamma.$$

- Glissement sans frottement à l'interface

$$(3) \quad P_{\text{lim}} = \underline{c} \xi_c N_c + \gamma D \underline{\xi}_q N_q + \frac{1}{2} \gamma B \underline{\xi}_\gamma N_\gamma$$

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

D : profondeur de la base de la fondation

B : largeur de la fondation

N_c, N_q, N_γ : coefficients sans dimensions dépendant de ϕ et donnant la pression limite d'une fondation exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène à surface horizontale (*)

ϕ : angle de frottement interne du sol

ξ_c, ξ_q, ξ_γ } coefficients sans dimensions, dépendant de ϕ et de B/H , dont
 $\underline{\xi}_c, \underline{\xi}_q, \underline{\xi}_\gamma$ } les valeurs sont données dans les tables et graphiques (**)

H : distance entre la base de la fondation et le substratum.

- Cas particulier : $\phi = 0$.

On a alors :

$$N_c = 5,14 \quad N_q = 1 \quad N_\gamma = 0 \quad \text{et} \quad \xi_q = \underline{\xi}_q = 1$$

(*) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

(**) Excepté $\underline{\xi}_\gamma$ dont les valeurs numériques n'ont pas encore pu être calculées.

et, par conséquent :

$$(4) \quad p_{\text{lim}} = 5,14 \xi_c c + \gamma D.$$

(frottement maximal à l'interface).

$$(5) \quad p_{\text{lim}} = 5,14 \xi_c c + \gamma D.$$

(glissement sans frottement à l'interface).

Exemple :

Considérons un radier de 16 m (52 ft) de large dont la base se trouve à la profondeur de 1,2 m (4 ft) et à 4 m (13 ft) au-dessus du substratum rocheux. Les propriétés du sol sont $c = 0,1 \text{ bar}$ (210 lb/sq. ft), $\phi = 20^\circ$ et $\gamma = 1,84 \text{ g/cm}^3$ (115 lb/cu. ft). Quelle est la force portante de cette fondation ?

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \gamma D &= 1\,840 \times 9,81 \times 1,2 \times 10^{-5} = 0,22 \text{ bar} \\ &= 115 \times 4 = 460 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= 0,5 \times 1\,840 \times 9,81 \times 16 \times 10^{-5} = 1,44 \text{ bar} \\ &= 0,5 \times 115 \times 52 = 3\,000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

On lit dans les tables ci-après, pour $\phi = 20^\circ$ et $B/H = 4$:

$$\xi_c = 3,29 \quad \xi_q = 2,93 \quad \xi_\gamma = 1,28$$

(en supposant qu'il y a adhérence entre la couche du sol et le substratum, sinon il faudrait prendre ξ_c , ξ_q et ξ_γ).

On lit dans les tables relatives à un sol homogène (*) :

$$N_c = 14,83 \quad N_q = 6,40 \quad N_\gamma = 3,54.$$

D'où le calcul de la pression limite :

$$\begin{aligned} p_{\text{lim}} &= 0,1 \times 3,29 \times 14,83 + 0,22 \times 2,93 \times 6,40 + 1,44 \times 1,28 \times 3,54 = 15,5 \text{ bars} \\ &= 210 \times 3,29 \times 14,83 + 460 \times 2,93 \times 6,40 + 3\,000 \times 1,28 \times 3,54 \\ &= 32\,400 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

(*) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

S'il n'y avait pas eu de substratum rigide, la pression limite aurait été :

$$p_{lim} = 8 \text{ bars (16 700 lb/sq. ft).}$$

Ce résultat a été obtenu en refaisant le calcul précédent avec $\xi_c = \xi_q = \xi_\gamma = 1$.

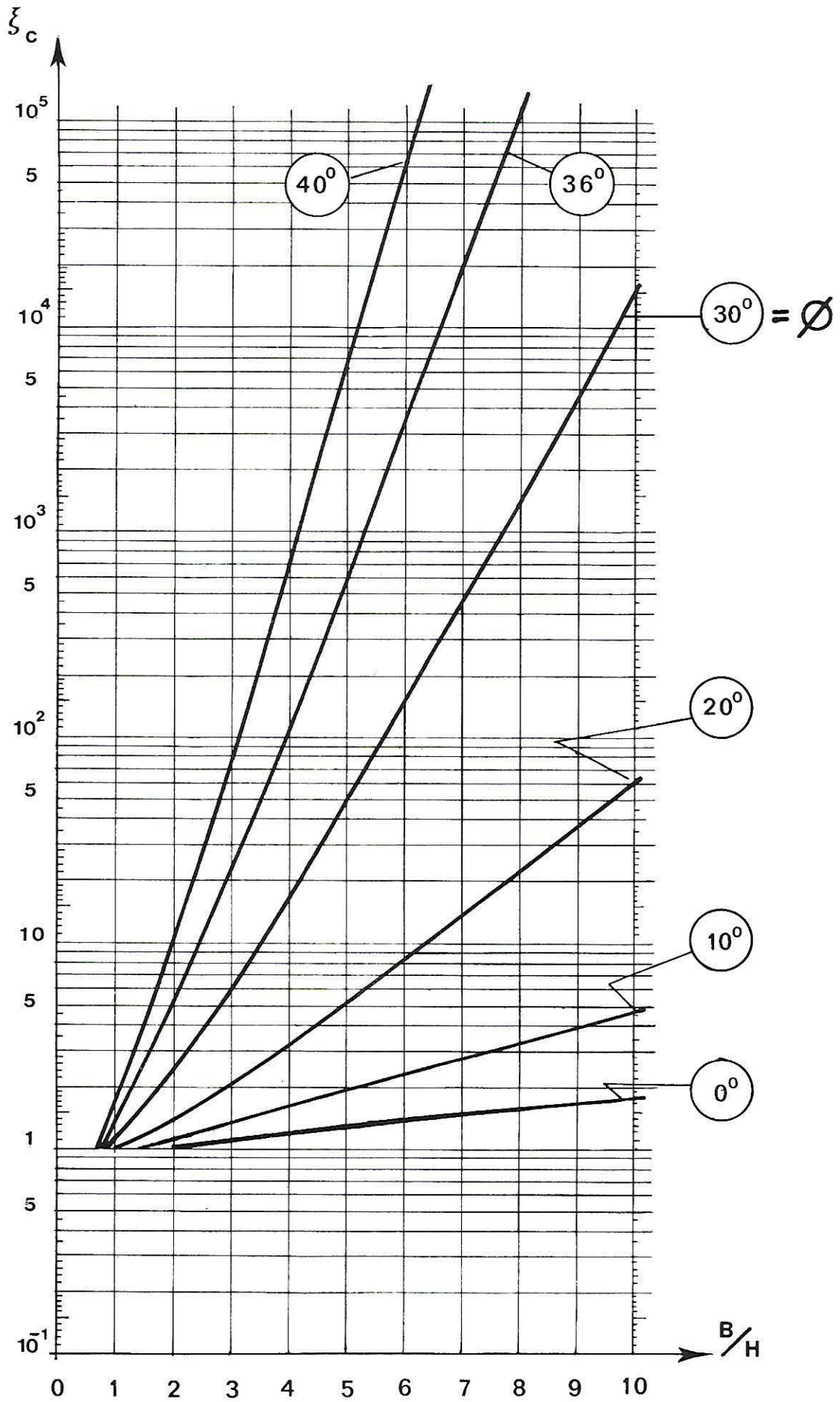
7-4

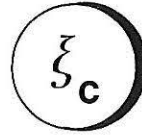
TABLES ET GRAPHIQUES

Successivement :

$\xi_c, \xi_q, \xi_\gamma, \xi_{c'}, \xi_{q'}$ p. 54-63

(Il ne manque que les valeurs numériques de ξ_γ qui n'ont pu être calculées jusqu'à présent.)

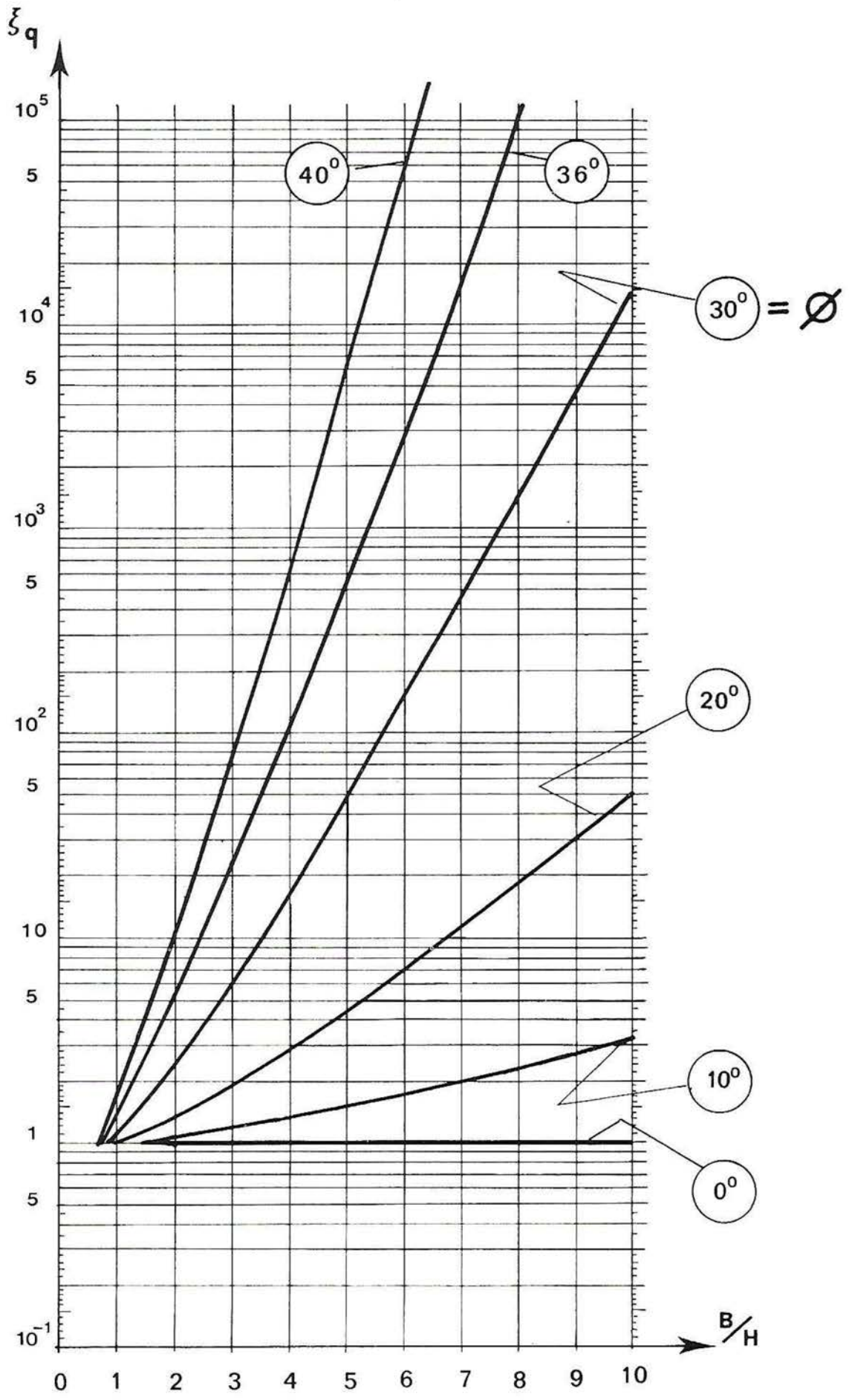




$\frac{B}{H}$ \varnothing		1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
40°	$\frac{B}{H} \leq 0.42$ $\xi_c = 1$	1.73	11.10	82.20	721.00	6396.00	$6.23 \cdot 10^4$	$6.05 \cdot 10^6$	$6.26 \cdot 10^8$			
36°	$\frac{B}{H} \leq 0.50$ $\xi_c = 1$	1.37	5.25	23.40	115.00	604.00	3293	$1.11 \cdot 10^5$	$3.78 \cdot 10^6$			
30°	$\frac{B}{H} \leq 0.63$ $\xi_c = 1$	1.13	2.50	6.36	17.4	50.20	150.00	1444.00	$1.48 \cdot 10^4$	$5.81 \cdot 10^6$		
20°	$\frac{B}{H} \leq 0.86$ $\xi_c = 1$	1.01	1.39	2.12	3.29	5.17	8.29	22.00	61.50	905.00	$1.50 \cdot 10^4$	
10°	$\frac{B}{H} \leq 1.12$ $\xi_c = 1$		1.11	1.35	1.62	1.95	2.33	3.34	4.77	11.70	29.40	
0°	$\frac{B}{H} \leq 1.414$ $\xi_c = 1$		1.02	1.11	1.21	1.30	1.40	1.59	1.78	2.27	2.75	3.72

(d'après MANDEL et SALENÇON)

7-4

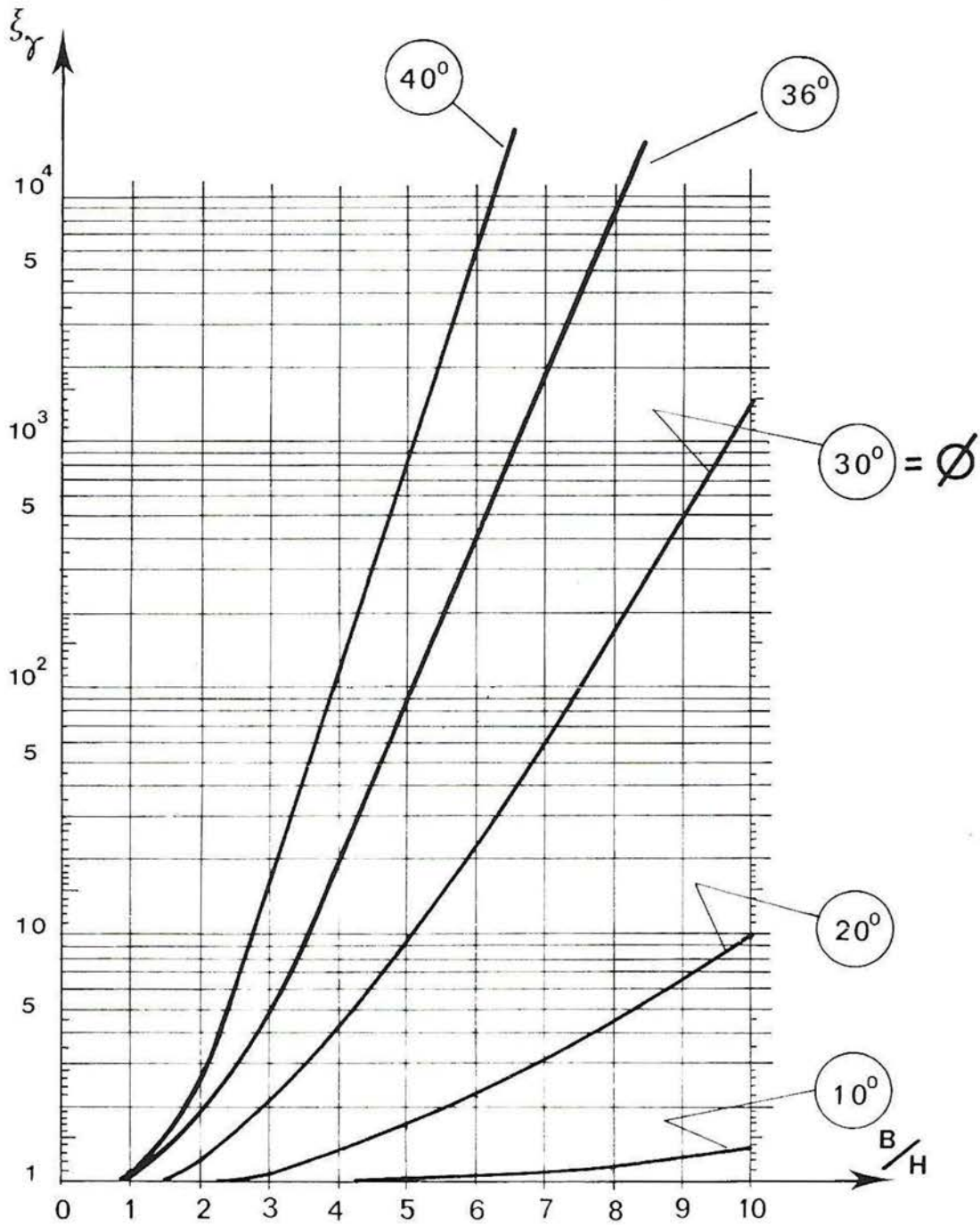


$$\xi_q$$

$\frac{B}{H}$ \emptyset		1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
40°	$\frac{B}{H} \leq 0.42$ $\xi_q = 1$	1.72	10.90	80.90	710.00	6296.00	$6.13 \cdot 10^4$	$5.95 \cdot 10^6$	$6.16 \cdot 10^8$			
36°	$\frac{B}{H} \leq 0.50$ $\xi_q = 1$	1.36	5.14	22.80	112.00	588.00	3206.00	$1.08 \cdot 10^5$	$3.68 \cdot 10^6$			
30°	$\frac{B}{H} \leq 0.63$ $\xi_q = 1$	1.12	2.42	6.07	16.5	47.50	142.00	1370.00	$1.40 \cdot 10^4$	$5.50 \cdot 10^6$		
20°	$\frac{B}{H} \leq 0.86$ $\xi_q = 1$	1.01	1.33	1.95	2.93	4.52	7.14	18.70	51.90	763.00	$1.26 \cdot 10^6$	
10°	$\frac{B}{H} \leq 1.12$ $\xi_q = 1$	1.07	1.07	1.21	1.37	1.56	1.79	2.39	3.25	7.37	17.90	92.30
0°	$\xi_q = 1$											

(d'après MANDEL et SALENÇON)

7-4

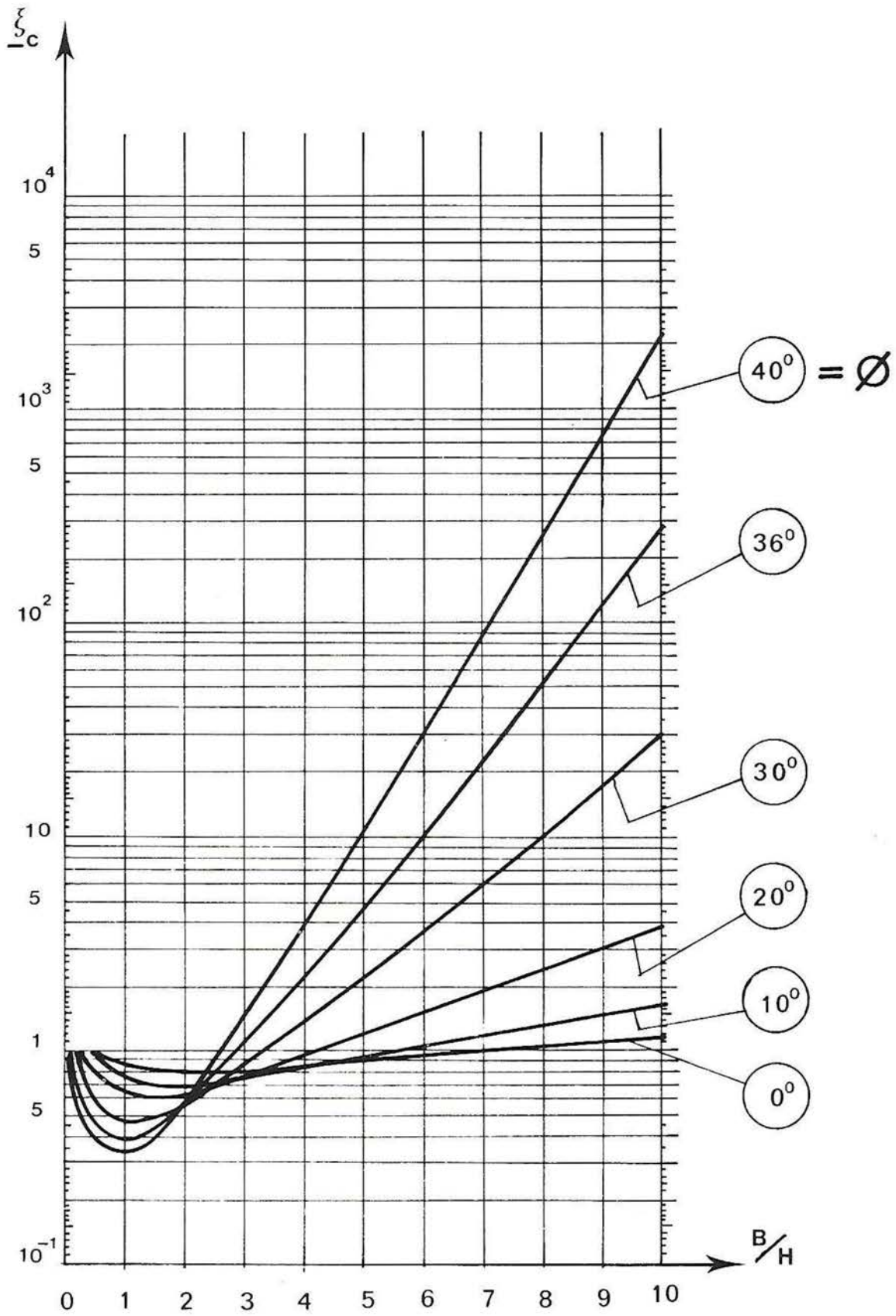


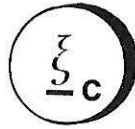


\varnothing \ B/H		1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	40
40°	$B/H \leq 0.81$ $\xi_\gamma = 1$	1.05	3.27	16.60	106.00	804.00	$6.15 \cdot 10^5$	$4.54 \cdot 10^5$	$3.90 \cdot 10^7$	$3.30 \cdot 10^{12}$	$3.80 \cdot 10^{17}$		
36°	$B/H \leq 0.98$ $\xi_\gamma = 1$	1.00	1.87	5.60	21.00	90.00	407.00	$1.02 \cdot 10^4$	$2.80 \cdot 10^5$	$1.50 \cdot 10^9$	$1.10 \cdot 10^{13}$		
30°	$B/H \leq 1.3$ $\xi_\gamma = 1$		1.20	2.07	4.23	9.90	24.80	178.00	1450.00	$3.81 \cdot 10^5$	$1.30 \cdot 10^8$	$1.95 \cdot 10^{13}$	
20°	$B/H \leq 2.14$ $\xi_\gamma = 1$			1.07	1.28	1.63	2.20	4.41	9.82	97.00	340.00	$2.60 \cdot 10^5$	$7.00 \cdot 10^7$
10°	$B/H \leq 4.07$ $\xi_\gamma = 1$					1.01	1.04	1.12	1.36	2.28	4.33	20.00	113.00
0°	$B/H < \infty$												

(d'après MANDEL et SALENÇON)

7-4





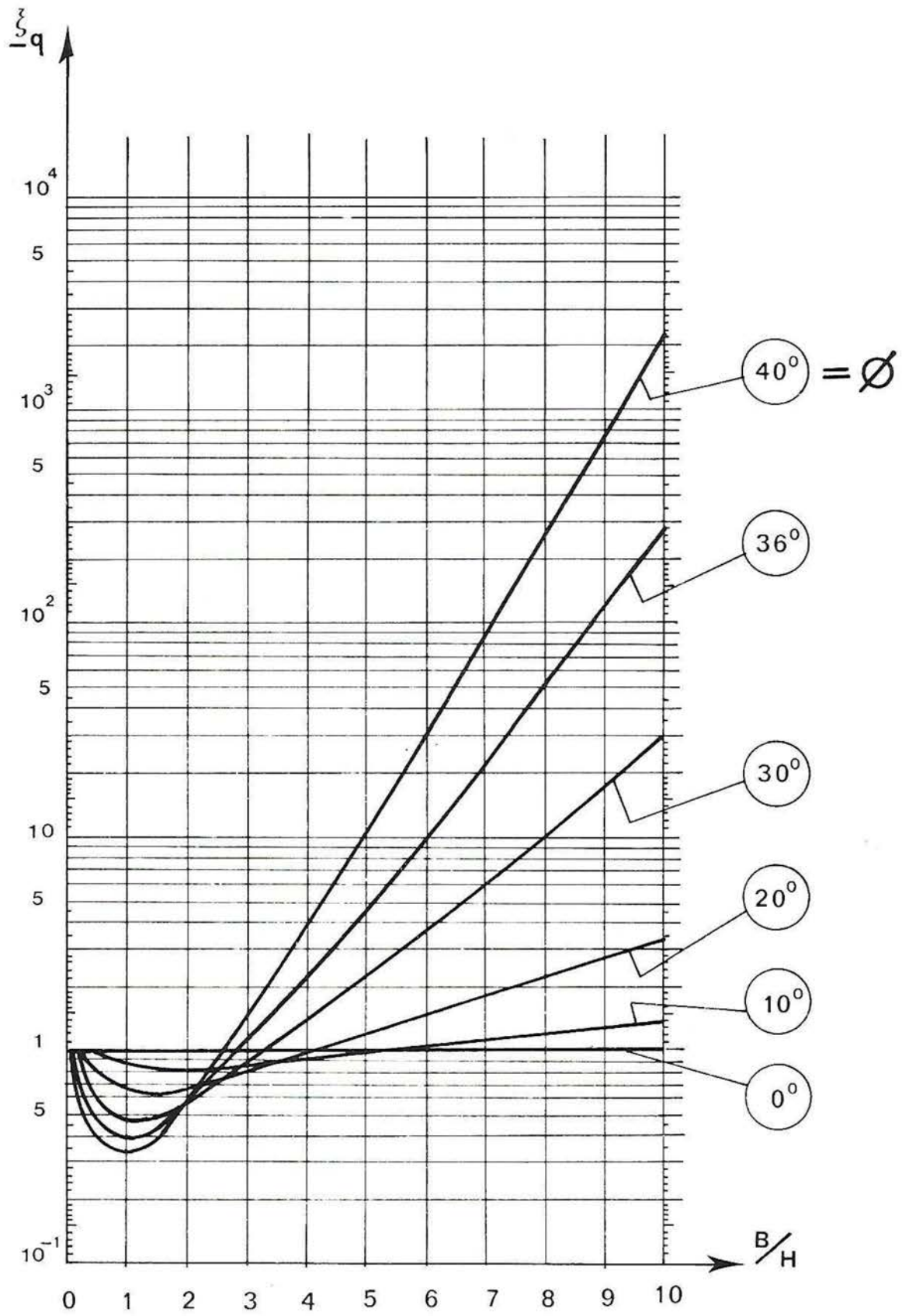
ξ_c	B/H	0.125	0.167	0.2	0.25	0.33	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
ϕ	H/B	8	6	5	4	3	2	1	0.5	0.33	0.25	0.2	0.167	0.125	0.1	0.067	0.05	0.033
40°	$\frac{H}{B} \geq 9.15$ $\xi_c = 1$	0.907	0.740	0.653	0.564	0.471	0.380	0.320	0.560	1.470	3.900	10.600	30.400	253.00	2367.00	6.98×10^5	2.32×10^8	
36°	$\frac{H}{B} \geq 6.99$ $\xi_c = 1$	0.904	0.796	0.688	0.577	0.463	0.381	0.557	1.140	2.400	4.880	10.700	52.90	290.00	2.07×10^5	1.82×10^6		
30°	$\frac{H}{B} \geq 4.96$ $\xi_c = 1$			0.874	0.735	0.591	0.464	0.562	0.891	1.46	2.33	3.78	10.5	30.2	491	8930	351×10^4	
20°	$\frac{H}{B} \geq 3.15$ $\xi_c = 1$				0.974	0.793	0.611	0.622	0.776	0.997	1.26	1.58	2.49	3.96	13.3	47.7	703	
10°	$\frac{H}{B} \geq 2.20$ $\xi_c = 1$					0.960	0.747	0.699	0.774	0.879	0.994	1.11	1.36	1.66	2.67	4.22	10,5	
0°	$\frac{H}{B} \geq 1.63$ $\xi_c = 1$						0.861	0.778	0.808	0.861	0.918	0.972	1.07	1.17	1.42			

ϕ	0°	10°	20°	30°	36°	40°
B/H	2.00	1.68	1.40	1.15	1.02	0.94
H/B	0.500	0.595	0.714	0.866	0.981	1.072
ξ_c min	0.778	0.691	0.585	0.460	0.376	0.319

ϕ	0°	10°	20°	30°	36°	40°	
$\xi_c < 1$	B/H >	0.61	0.45	0.32	0.20	0.14	0.11
	B/H <	6.54	5.3	4.10	3.20	2.75	2.55
	H/B >	0.15	0.19	0.24	0.31	0.36	0.39
	H/B <	1.63	2.20	3.15	4.96	6.99	9.15

(d'après MANDEL et SALENÇON)

7-4





ξ_q	B/H	0.125	0.167	0.2	0.25	0.33	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
\emptyset	H/B	8	6	5	4	3	2	1	0.5	0.33	0.25	0.2	0.167	0.125	0.1	0.067	0.05	0.033
40°	$\frac{H}{B} \geq 9.15$ $\xi_q = 1$	0.908	0.744	0.658	0.571	0.479	0.390	0.331	0.567	1.463	3.855	10.45	29.94	249.07	2330	68.71×10^4	228×10^6	
36°	$\frac{H}{B} \geq 6.99$ $\xi_q = 1$	0.907	0.801	0.696	0.588	0.477	0.397	0.569	1.136	2.363	4.777	10.44	51.53	282.34	201.5×10^3	177×10^4		
30°	$\frac{H}{B} \geq 4.96$ $\xi_q = 1$			0.881	0.749	0.613	0.493	0.586	0.897	1.435	2.258	3.629	9.984	28.61	464.37	8 444	332×10^4	
20°	$\frac{H}{B} \geq 3.15$ $\xi_q = 1$				0.978	0.825	0.672	0.681	0.811	0.997	1.219	1.489	2.257	3.498	11.38	40.40	593.3	
10°	$\frac{H}{B} \geq 2.20$ $\xi_q = 1$					0.976	0.849	0.821	0.865	0.928	0.996	1.065	1.214	1.393	1.994	2.916	6.654	
0°	$\xi_q = 1$																	

\emptyset	10°	20°	30°	36°	40°
B/H	1.68	1.40	1.15	1.02	0.94
H/B	0.595	0.714	0.866	0.981	1.072
$\xi_{q \min}$	0.816	0.650	0.489	0.393	0.330

\emptyset	10°	20°	30°	36°	40°	
$\xi_q < 1$	B/H >	0.45	0.32	0.20	0.14	0.11
	B/H <	5.3	4.10	3.20	2.75	2.55
	H/B >	0.19	0.24	0.31	0.36	0.39
	H/B <	2.20	3.15	4.96	6.99	9.15

(d'après MANDEL et SALENÇON)

EXPRESSION DES COEFFICIENTS

Les seules expressions analytiques sont celles qui relient ξ_q à ξ_c et

$\frac{\xi_q}{N_q}$ à $\frac{\xi_c}{N_c}$:

$$\xi_q = \xi_c - \frac{\xi_c - 1}{N_q} .$$

$$\frac{\xi_q}{N_q} = \frac{\xi_c}{N_c} - \frac{\xi_c - 1}{N_q} .$$

BIBLIOGRAPHIE

Les résultats indiqués dans cette section ont été obtenus, sous la direction de J. Mandel, par J. Salençon [1, 2] qui nous a autorisé à les reproduire, ce dont nous le remercions très vivement.

REFERENCES

- [1] J. MANDEL et J. SALENÇON, "Force portante d'un sol sur une assise rigide", Comptes Rendus du 7^e Congrès International de Mécanique des Sols et Fondations, 2 (Mexico, 1969), 157-164.
- [2] J. MANDEL et J. SALENÇON, "Force portante d'un sol sur assise rigide - Etude théorique", Géotechnique, 22, 1 (Mars 1972), 79-93.

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol composé de deux couches horizontales

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Remarque importante
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est composé de deux couches horizontales (Fig. 1). La première, d'épaisseur $H + D$, a pour cohésion c_1 et angle de frottement interne ϕ_1 . Elle repose sur une couche d'épaisseur infinie et de propriétés mécaniques c_2 et ϕ_2 . Le contact entre les deux couches se fait en mobilisant, s'il le faut, la totalité du frottement et de la cohésion.

Le poids volumique du sol, γ , est supposé identique dans les deux couches. S'il ne l'est pas, on obtient une *majorante* et une *minorante* de la pression limite en faisant le calcul avec, respectivement, la plus forte et la plus faible des deux valeurs du poids volumique.

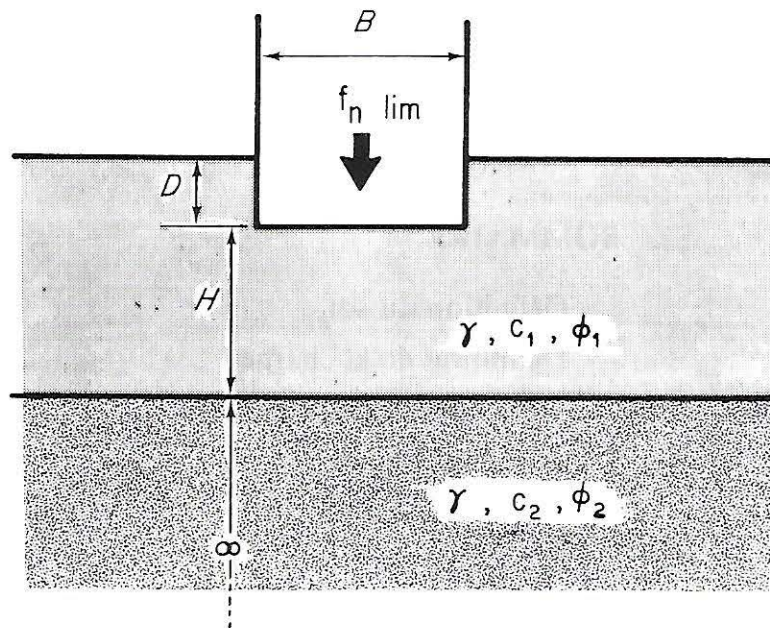


FIG. 1. — Définition du sol et de la charge. On appelle interface le plan de séparation des deux couches.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B . Sa base horizontale, située à la profondeur D , est rigide (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge verticale et centrée dont la valeur limite (à la rupture) est dési-

gnée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite moyenne, ou pression portante, est donnée par :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

REMARQUE IMPORTANTE

Les valeurs de la pression limite calculées à l'aide des formules de cette section doivent être regardées avec la plus grande prudence. En effet, les coefficients de force portante utilisés ci-après ont été obtenus par une méthode approchée particulière (*) et leurs valeurs peuvent ne pas concorder avec celles des coefficients des autres sections, eux-mêmes calculés avec d'autres approximations. Il est donc recommandé de prendre les deux précautions suivantes :

1. En plus de la division classique, par un coefficient de sécurité (**), de la force portante calculée, on peut augmenter la sécurité en utilisant, dans la formule (3), (4) ou (5), la plus petite des deux valeurs du coefficient N obtenues à l'aide des deux épaisseurs fictives H' et H'' telles que :

$$(2) \quad \begin{cases} H'/B = H/B + 0,25 \\ H''/B = H/B - 0,25. \end{cases}$$

2. On peut vérifier le résultat fourni par l'une des formules (3), (4) ou (5) suivantes en calculant des valeurs majorantes ou minorantes à l'aide de formules figurant dans d'autres sections. Ainsi, en considérant que tout le sol est homogène (***) , soit avec les propriétés de la couche supérieure (c_1, ϕ_1), soit avec les propriétés de la couche inférieure

(*) Cette méthode, utilisée également pour les sections 7-6 et 7-7, est celle des cercles de glissement alors que, dans toutes les autres sections, l'étude théorique a été faite en supposant l'équilibre limite atteint dans tout le massif (voir l'avant-propos du volume 3).

(**) Voir l' "Introduction au calcul des forces portantes" en tête de ce volume.

(***) Pour le calcul de la pression limite, voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

(c_2, ϕ_2), on obtient deux valeurs de la pression limite : la plus grande est une majorante et la plus petite une minorante de la force portante du sol bicouche. Par ailleurs, on obtient une autre majorante en remplaçant la couche inférieure par un substratum rigide (*). Nous ne cachons pas qu'il est possible, dans certains cas, que le résultat du calcul fait à l'aide de la formule (3), (4) ou (5) ne respecte pas soit une *majorante* soit une *minorante*. Pour les raisons indiquées plus haut, il n'est guère possible de dire si cette anomalie provient de cette section ou des autres. Placé devant un tel problème, l'ingénieur doit donc prendre le parti le plus prudent. Une telle démarche est illustrée, plus loin, par l'exemple 1.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

En toute rigueur, les formules données ci-après ne permettent le calcul de la pression limite que dans le cas où la base de la fondation est au niveau du sol ($D = 0$). Nous indiquerons plus loin comment on peut, de façon approchée, adapter les résultats obtenus avec $D = 0$ au cas d'une fondation enterrée ($D \neq 0$).

- Fondation non enterrée ($D = 0$) :

Dans ce cas, H , distance entre la base de la fondation et l'interface (Fig. 1), n'est autre que l'épaisseur de la couche supérieure de sol. Considérons trois cas selon la nature du sol :

• *Cas général* :

La pression limite est donnée par :

$$(3) \quad P_{\text{lim}} = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma c 2H}$$

avec :

γ : poids volumique du sol (supposé identique dans les deux couches) (**)

B : largeur de la fondation

(*) Voir le cas où la couche de sol et le substratum adhèrent parfaitement dans la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur une couche horizontale et d'épaisseur finie de sol homogène" (Section 7-4).

(**) Voir plus haut dans cette section le paragraphe "Définition du sol".

$N_{\gamma c 2H}$: coefficient sans dimensions dépendant de c_2/c_1 , $c_1/\gamma B$, ϕ_1 , ϕ_2 et H/B si $c_1 \neq 0$ et de $c_2/\gamma B$, ϕ_1 , ϕ_2 et H/B si $c_2 = 0$ et dont les valeurs numériques sont données sous forme de tables et de graphiques

c_1 , c_2 : cohésion respectivement de la couche supérieure et inférieure

ϕ_1 , ϕ_2 : angle de frottement interne respectivement des couches supérieure et inférieure

H : distance entre la base de la fondation et l' "interface" (plan séparant les deux couches de sol).

- *Cas particulier* : sol purement cohérent ($\phi_1 = \phi_2 = 0$).

Dans ce cas, on peut fort bien calculer la pression limite à l'aide de la formule (3) qui fait intervenir le coefficient $N_{\gamma c 2H}$. Mais ce dernier est alors proportionnel à $c_1/\gamma B$ et, dans ces conditions, il est beaucoup plus simple d'exprimer la pression limite par la formule suivante :

$$(4) \quad P_{lim} = c_1 N_{c12H}^0$$

avec :

N_{c12H}^0 : coefficient sans dimensions dépendant de H/B et c_2/c_1 et dont les valeurs numériques sont données dans une table et un graphique

c_1 , c_2 : cohésion respectivement de la couche supérieure et inférieure

H : distance entre la base de la fondation et l' "interface" (plan séparant les deux couches - voir Fig. 1)

B : largeur de la fondation.

- *Cas particulier* : sol pulvérulent ($c_1 = c_2 = 0$).

Le rapport c_2/c_1 qui sert de clé aux tables de valeurs numériques de $N_{\gamma c 2H}$ est alors indéterminé et il devient indispensable d'utiliser un autre coefficient, $N_{\gamma 2H}$, qui entre dans la formule suivante :

$$(5) \quad P_{lim} = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma 2H}$$

avec :

γ : poids volumique du sol, supposé égal dans les deux couches (*)

B : largeur de la fondation

$N_{\gamma 2H}$: coefficient sans dimensions dépendant de ϕ_1 , ϕ_2 et H/B

ϕ_1 , ϕ_2 : angle de frottement interne, respectivement, de la couche supérieure et inférieure

H : distance entre la base de la fondation et l'interface (plan séparant les deux couches).

- Fondation enterrée ($D \neq 0$) :

Dans ce cas, on ajoute à la pression limite calculée pour $D = 0$, avec l'une des formules (3), (4) ou (5), le terme suivant :

$$(6) \quad q = \alpha \gamma' DN_{q1}$$

avec :

γ' : poids volumique des terres situées entre la surface du sol et le niveau de la base de la fondation

D : profondeur de la base de la fondation (voir Fig. 1)

α : coefficient sans dimensions dont la valeur est :

$$(7) \quad \alpha = 1 \quad \text{pour } B < B'$$

ou :

$$(8) \quad \alpha = \frac{N_{q2}}{N_{q1}} \left(1 + \varepsilon \frac{H}{B} \right) \quad \text{pour } B > B'.$$

avec :

$$\varepsilon = \begin{cases} + 1 & \text{pour } \phi_2 < \phi_1 \\ - 1 & \text{pour } \phi_2 > \phi_1 \end{cases}$$

$$(9) \quad B' = \frac{HN_{q2}}{|N_{q1} - N_{q2}|}$$

(*) Voir plus haut, le § "Définition du sol".

N_{q1} : valeur (*) de N_q pour $\phi = \phi_1$

N_{q2} : valeur (*) de N_q pour $\phi = \phi_2$

H : distance entre la base de la fondation et l'interface

B : largeur de la fondation.

L'expression (6) est approchée ; elle résulte d'une interpolation proportionnelle à H/B entre N_{q1} et N_{q2} (interpolation qui est généralement dans le sens de la sécurité, mais pas toujours).

Exemple 1 :

Considérons une fondation dont la base a pour largeur 16 m (52 ft). Elle est posée à la surface d'un sol composé d'une couche de 4 m (13 ft) d'épaisseur, de cohésion 0,15 bar (310 lb/sq. ft) et d'angle de frottement 20°. Cette couche repose sur un sol de très grande épaisseur, de cohésion nulle et d'angle de frottement égal à 30°. Le poids volumique moyen des deux couches de sol est de 1,84 g/cm³ (115 lb/cu. ft). Quelle pression limite cette fondation peut-elle exercer sur le sol ?

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \gamma B &= 1\,840 \times 16 \times 9,81 = 288\,000 \text{ N/m}^2 = 2,88 \text{ bars} \\ &= 115 \times 52 = 6\,000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Ensuite, pour :

$$\begin{aligned} c_2/c_1 &= 0 & H/B &= 0,25 & c_1/\gamma B &= 0,05 \\ \phi_1 &= 20^\circ & \text{et } \phi_2 &= 30^\circ, & \text{on lit dans les tables :} \end{aligned}$$

$$N_{\gamma c 2H} = 15,2$$

d'où, avec la formule (3) :

$$\begin{aligned} P_{lim} &= \frac{1}{2} \times 2,88 \times 15,2 = 22 \text{ bars} \\ &= \frac{1}{2} \times 6\,000 \times 15,2 = 45\,600 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

(*) Les valeurs de N_q sont données sous forme de table et de graphique dans la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

Mais, d'après la "Remarque Importante" faite plus haut, il est recommandé de prendre une sécurité supplémentaire en remplaçant la vraie valeur de H/B par $H/B \pm 0,25$ (voir formule (2) plus haut), soit 0 ou 0,5. La plus petite des deux valeurs ainsi obtenues pour $N_{\gamma c 2H}$ est 12,40 (qui correspond à $H/B = 0,5$), d'où :

$$p_{lim} = \frac{1}{2} \times 2,88 \times 12,40 = 18 \text{ bars}$$

$$= \frac{1}{2} \times 6\,000 \times 12,40 = 37\,000 \text{ lb/sq. ft.}$$

Il est recommandé, également, de déterminer des majorantes et des minorantes pour la valeur de p_{lim} à l'aide de formules se trouvant dans d'autres sections. En premier lieu, considérons le sol comme homogène (*) :

- Si $c = 0,15$ bar (310 lb/sq. ft), et $\phi = 20^\circ$

on a :

$$p_{lim} = 0,15 \times 14,83 + 144 \times 3,54 = 7 \text{ bars}$$

$$= 310 \times 14,83 + 3\,000 \times 3,54 = 15\,000 \text{ lb/sq. ft.}$$

- Si $c = 0$ et $\phi = 30^\circ$, on a :

$$p_{lim} = 1,44 \times 18,1 = 26 \text{ bars}$$

$$= 3\,000 \times 18,1 = 54\,000 \text{ lb/sq. ft.}$$

Une autre majorante est obtenue en remplaçant la couche inférieure par un substratum rigide (voir Section 7-4) :

$$p_{lim} = 0,15 \times 3,29 \times 14,83 + 1,44 \times 1,28 \times 3,54 = 14 \text{ bars}$$

$$= 310 \times 3,29 \times 14,83 + 3\,000 \times 1,28 \times 3,54 = 29\,000 \text{ lb/sq. ft.}$$

En conclusion, on voit que la valeur de 22 bars (45 600 lb/sq. ft) obtenue par un premier calcul est réduite à 18 bars (37 000 lb/sq. ft) en augmentant la sécurité grâce à l'emploi d'une épaisseur fictive (formule (2)). Ces deux valeurs respectent bien les deux bornes (7 et 26 bars) (15 000 et 54 000 lb/sq. ft) obtenues à l'aide d'un sol homogène mais ne respectent pas la majorante de 14 bars (29 000 lb/sq. ft) obtenue en remplaçant la couche inférieure par un substratum rigide. Il est donc prudent de retenir pour la pression limite la valeur de 14 bars (29 000 lb/sq. ft). Bien entendu, il faut diviser cette valeur par un coefficient de sécurité, 3 par exemple, pour avoir la pression admissible (voir l'introduction du volume 3).

(*) Pour le calcul, voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

Exemple 2 :

De combien la pression limite de la fondation de l'exemple 1 serait-elle augmentée si l'on rajoutait, sur les côtés, 1,20 m (4 ft) de remblai de poids volumique égal à $2,08 \text{ g/cm}^3$ (130 lb/cu. ft) ?

Le terme à rajouter à la pression limite, calculée dans l'exemple 1, est donné par la formule (6).

Dans la table de la section 7-1, on lit :

$$\text{pour } \phi_1 = 20^\circ \quad N_{q1} = 6,40$$

$$\text{pour } \phi_2 = 30^\circ \quad N_{q2} = 18,40$$

d'où :

$$\begin{aligned} B' &= 4 \frac{18,4}{18,4 - 6,4} = 6,1 \text{ m} \\ &= 13 \frac{18,4}{18,4 - 6,4} = 20 \text{ ft.} \end{aligned}$$

Cette valeur étant inférieure à B, on a :

$$\alpha = \frac{18,4}{6,4} \left(1 - \frac{4}{16} \right) = 2,16$$

d'où :

$$\begin{aligned} q &= 2,16 \times 2\,080 \times 9,81 \times 1,2 \times 6,40 = 340\,000 \text{ N/m}^2 = 3,4 \text{ bars} \\ &= 2,16 \times 130 \times 4 \times 6,40 = 7\,200 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

TABLES ET GRAPHIQUES

On trouve successivement :

Coefficient $N_{\gamma c2H}$ (valable dans tous les cas sauf c_1 et c_2 tous deux nuls)

six séries de tables et graphiques classés selon :

$c_2/c_1 = 0, 0,5, 1, 2, 5, 10$ p. 74-133

et une série pour $c_1 = 0$ p. 134-143

Coefficient N_{c12H}^0 (cas $\phi_1 = \phi_2 = 0$)

Bien que dans ce cas-là le coefficient $N_{\gamma c2H}$ convienne, il est beaucoup plus simple d'utiliser N_{c12H}^0 : une table

et un graphique p. 144-145

Coefficient $N_{\gamma 2H}$ (cas $c_1 = c_2 = 0$)

Une table et un graphique p. 146-147

7-5

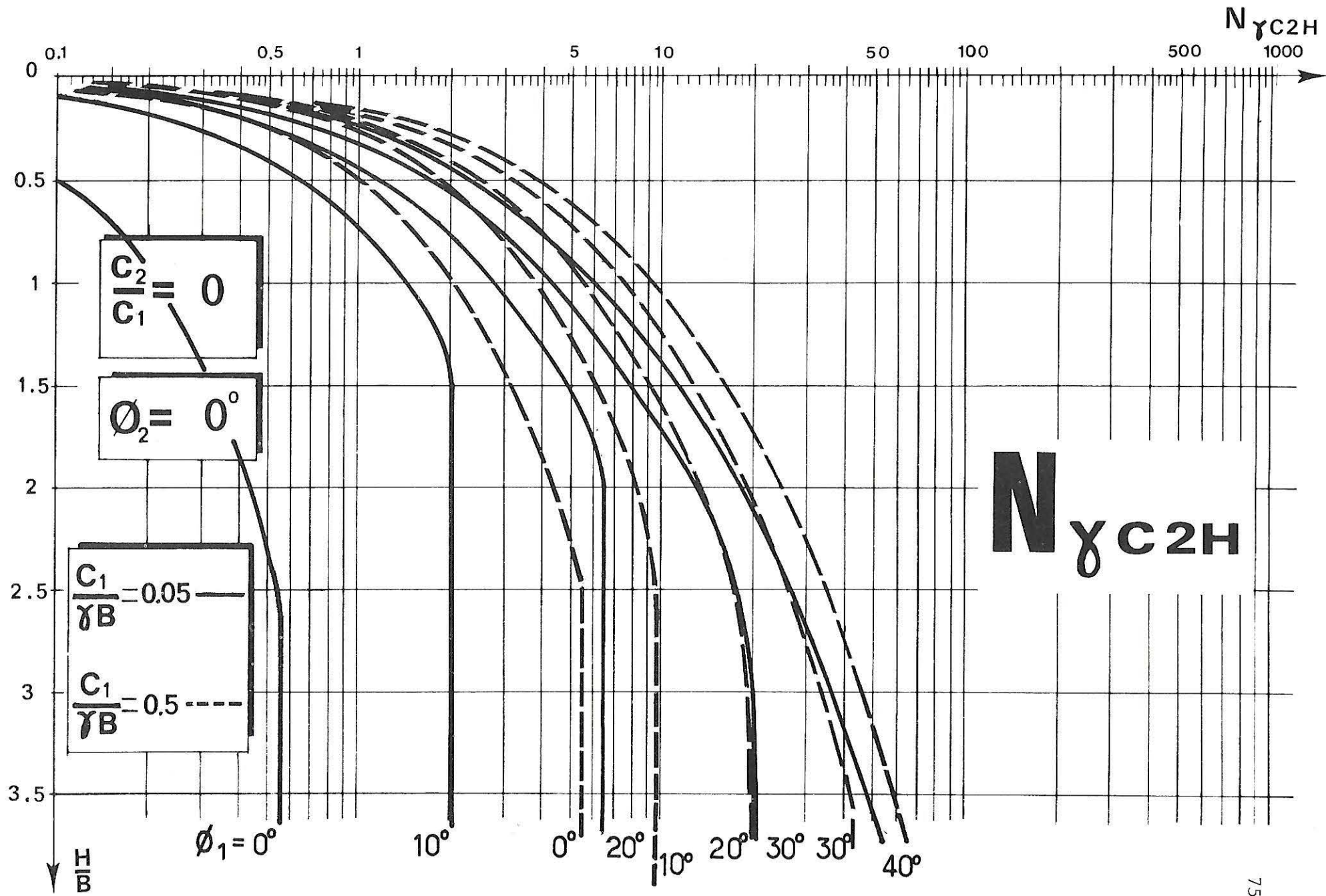
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.5
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50
0.1	0.02	0.10	0.17	0.24	0.32	0.05
	0.20	0.35	0.45	0.54	0.63	0.5
	2.02	2.41	2.61	2.78	2.94	5
	20.27	21.23	21.78	22.22	22.62	50
0.2	0.04	0.21	0.36	0.53	0.71	0.05
	0.40	0.72	0.92	1.12	1.32	0.5
	4.07	4.84	5.26	5.63	5.97	5
	40.78	42.49	43.64	44.60	45.47	50
0.3	0.06	0.32	0.58	0.85	1.16	0.05
	0.61	1.09	1.42	1.74	2.08	0.5
	6.14	7.27	7.94	8.54	9.11	5
	61.45	63.77	65.58	67.12	68.53	50
0.4	0.08	0.45	0.81	1.21	1.67	0.05
	0.82	1.47	1.93	2.40	2.90	0.5
	8.21	9.72	10.65	11.51	12.34	5
	82.18	85.09	87.60	89.77	91.81	50
0.5	0.10	0.57	1.05	1.61	2.23	0.05
	1.03	1.85	2.46	3.09	3.78	0.5
	10.32	12.18	13.40	14.53	15.65	5
	103.21	106.43	109.69	112.56	115.28	50
1	0.20	1.33	2.60	4.14	5.97	0.05
	2.09	3.89	5.43	7.15	9.10	0.5
	20.92	24.67	27.60	30.49	33.49	5
	209.22	213.59	221.27	228.43	235.47	50
1.5	0.32	2.02	4.70	7.66	11.23	0.05
	3.20	6.16	8.95	12.20	15.98	0.5
	32.04	37.49	42.60	47.84	53.40	5
	320.42	321.46	334.62	347.26	359.93	50
2	0.43	2.02	6.42	12.23	18.10	0.05
	4.36	8.67	13.07	18.30	24.45	0.5
	43.68	50.66	58.40	66.52	75.28	5
	436.85	438.25	449.62	468.81	488.27	50
2.5	0.55	2.02	6.42	17.86	26.57	0.05
	5.50	9.82	17.80	25.44	34.55	0.5
	55.06	64.18	74.97	86.49	99.07	5
	550.62	553.46	566.20	592.89	620.20	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	36.66	0.05
	5.55	9.82	19.22	33.65	46.26	0.5
	55.57	78.05	92.30	107.72	124.71	5
	555.72	649.34	684.27	719.36	755.49	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	48.39	0.05
	5.55	9.82	19.22	42.93	59.58	0.5
	55.57	86.09	110.39	130.18	152.18	5
	555.72	760.00	803.78	848.11	893.98	50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0$

$\phi_2 = 0^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	2.5	1.5	2	3	4.5	0.05
	3	2.5	3	4	5.5	0.5
	3	3.5	4.5	5	8	5
	3	4	5.5	7	9	50



7-5

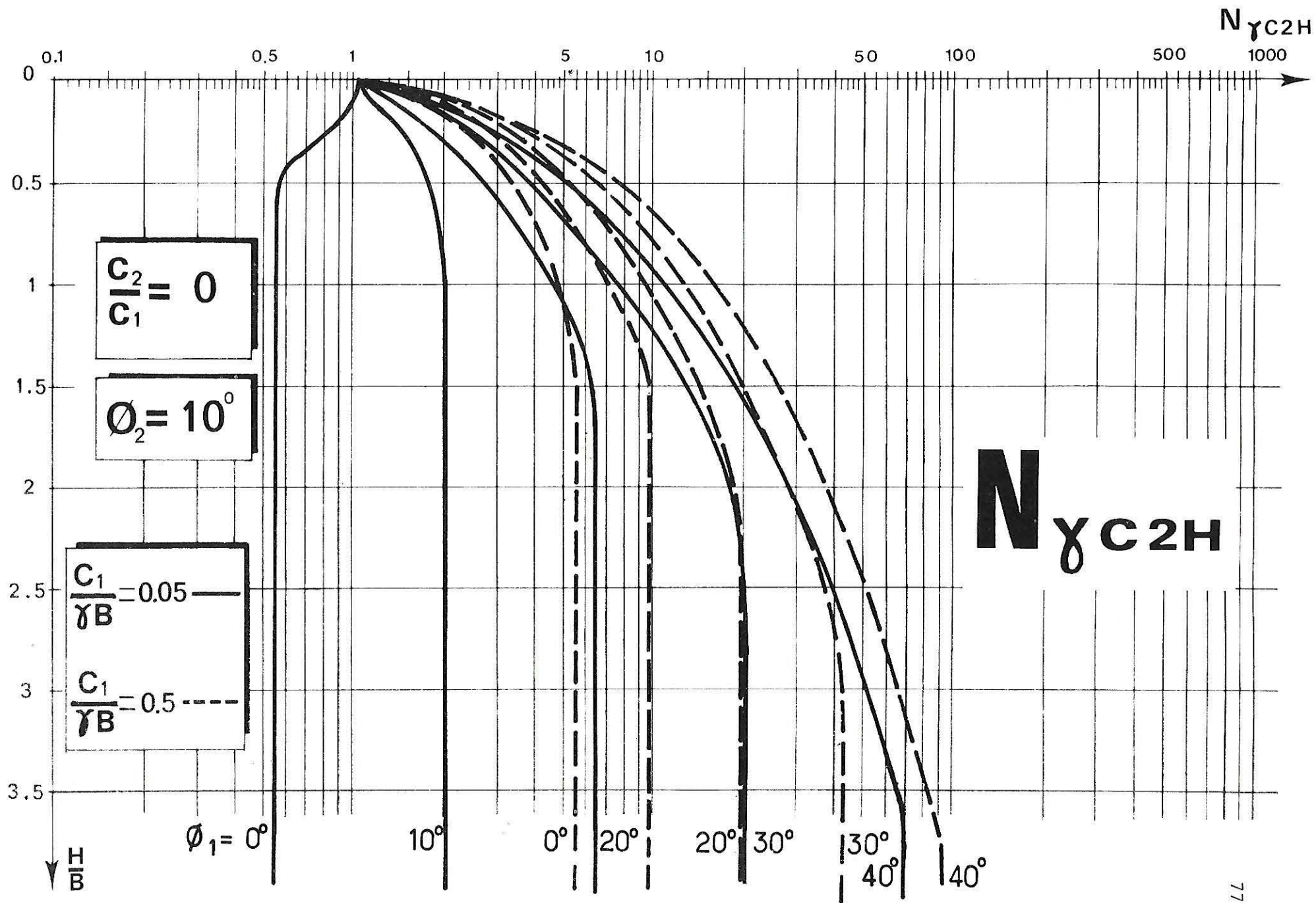
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	0.05
	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	0.5
	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	5
	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	50
0.1	1.00	1.18	1.38	1.58	1.79	0.05
	1.72	1.90	2.08	2.27	2.47	0.5
	6.09	6.28	6.48	6.69	6.90	5
	36.75	37.13	37.52	37.92	38.32	50
0.2	0.90	1.32	1.69	2.11	2.56	0.05
	2.20	2.55	2.90	3.32	3.71	0.5
	9.81	10.28	10.77	11.26	11.77	5
	66.82	67.84	68.88	69.94	71.00	50
0.3	0.74	1.39	2.01	2.65	3.36	0.05
	2.62	3.12	3.70	4.30	4.97	0.5
	13.24	14.02	14.82	15.67	16.56	5
	95.66	97.51	99.37	101.27	103.18	50
0.4	0.61	1.50	2.34	3.25	4.19	0.05
	2.98	3.68	4.46	5.33	6.29	0.5
	16.50	17.62	18.80	20.03	21.35	5
	123.83	126.62	129.47	132.36	135.31	50
0.5	0.57	1.61	2.69	3.84	5.14	0.05
	3.32	4.21	5.23	6.39	7.69	0.5
	19.64	21.13	22.73	24.41	26.19	5
	151.47	155.34	159.27	163.26	167.32	50
1	0.55	2.02	4.67	7.46	10.77	0.05
	4.90	6.88	9.29	12.21	15.61	0.5
	34.42	38.20	42.31	46.78	51.62	5
	285.06	295.91	306.92	318.10	329.50	50
1.5	0.55	2.02	6.42	12.16	18.23	0.05
	5.55	9.65	13.86	19.05	25.33	0.5
	49.15	55.01	62.32	70.40	79.31	5
	414.85	434.74	454.86	475.36	496.34	50
2	0.55	2.02	6.42	18.10	27.62	0.05
	5.55	9.82	19.07	27.11	36.99	0.5
	55.57	72.09	83.14	95.56	109.43	5
	555.72	573.28	604.12	635.64	668.01	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	39.12	0.05
	5.55	9.82	19.22	36.50	50.73	0.5
	55.57	86.09	104.86	122.29	141.97	5
	555.72	712.13	755.00	798.98	844.34	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	52.68	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	66.54	0.5
	55.57	86.09	127.49	150.56	176.88	5
	555.72	848.97	907.60	965.32	1025.12	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	68.32	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	84.40	0.5
	55.57	86.09	143.92	180.36	214.10	5
	555.72	848.97	1061.92	1134.58	1210.16	50
$\frac{H}{B} \geq \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0$

$\phi_2 = 10^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	1	1.5	2.5	4	0.05
	1.5	1	2.5	3	4.5	0.5
	2	2.5	3.5	5	7.5	5
	2	3	4	6	8.5	50



7-5

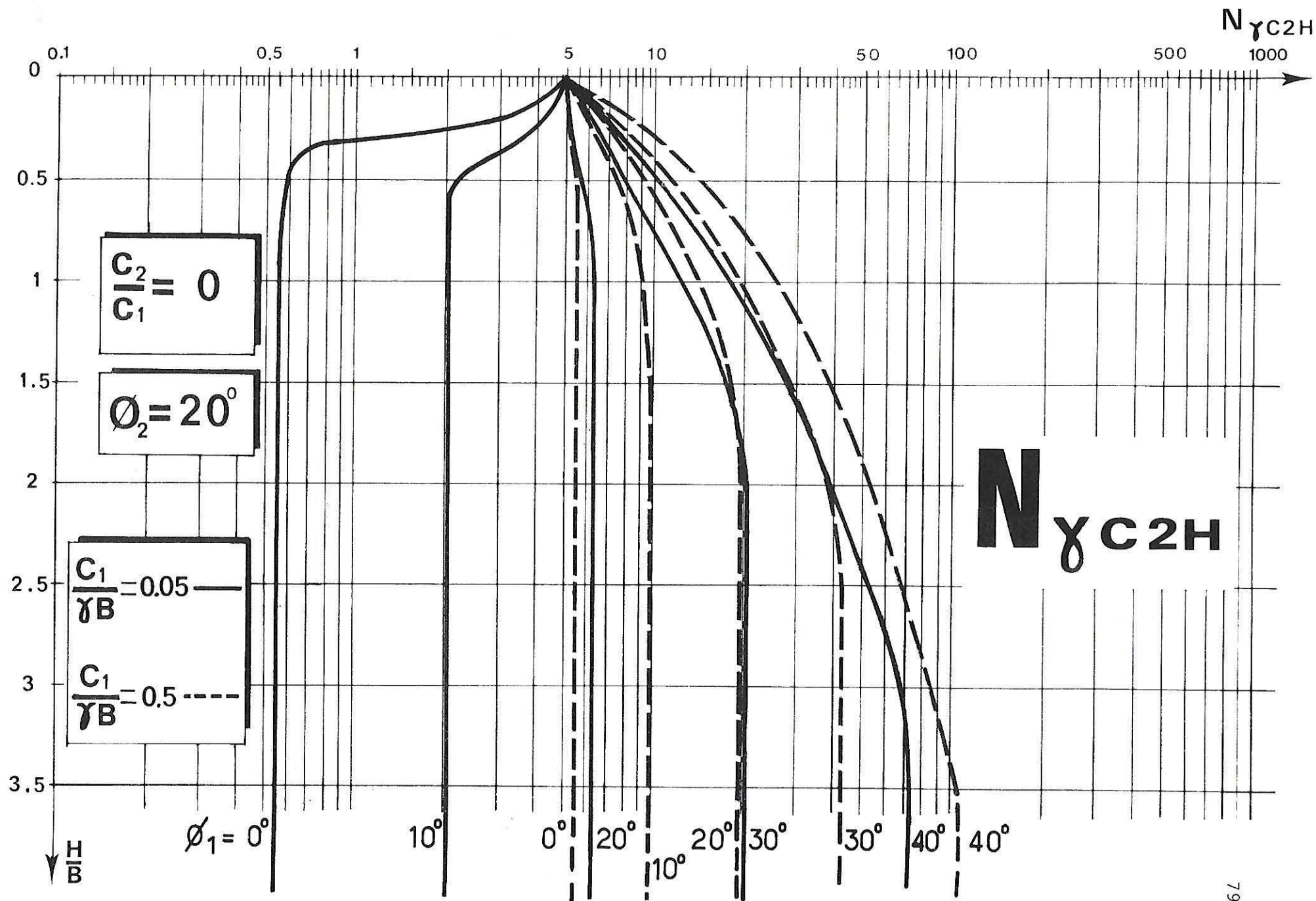
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	0.05
	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	0.5
	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	5
	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	50
0.1	3.99	4.55	5.00	5.47	5.93	0.05
	5.01	5.44	5.93	6.36	6.81	0.5
	11.76	12.19	12.63	13.10	13.58	5
	56.01	56.74	57.49	58.24	59.01	50
0.2	3.12	4.10	5.12	6.06	7.01	0.05
	5.16	6.04	6.86	7.74	8.69	0.5
	16.83	17.74	18.72	19.76	20.77	5
	96.61	98.51	100.33	102.31	104.28	50
0.3	0.77	3.75	5.25	6.67	8.26	0.05
	5.28	6.50	7.74	9.16	10.57	0.5
	21.25	22.75	24.31	25.98	27.67	5
	134.40	137.73	141.10	144.50	147.97	50
0.4	0.61	2.60	5.31	7.31	9.44	0.05
	5.38	6.94	8.61	10.48	12.51	0.5
	25.29	27.40	29.64	32.01	34.46	5
	170.63	175.67	180.74	185.88	191.11	50
0.5	0.57	2.20	5.50	8.09	10.85	0.05
	5.55	7.36	9.52	11.83	14.47	0.5
	29.07	31.84	34.81	37.95	41.27	5
	205.71	212.67	219.70	226.82	234.04	50
1	0.55	2.02	6.42	12.01	18.27	0.05
	5.55	9.35	13.74	19.01	25.32	0.5
	45.81	52.34	59.52	67.31	75.83	5
	369.93	389.32	408.73	428.31	448.20	50
1.5	0.55	2.02	6.42	17.44	27.83	0.05
	5.55	9.82	18.56	27.12	37.91	0.5
	55.57	71.61	83.77	97.36	112.47	5
	550.14	558.53	593.90	629.47	665.66	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	39.53	0.05
	5.55	9.82	19.22	36.43	52.67	0.5
	55.57	86.09	108.40	128.60	151.51	5
	555.72	724.50	778.43	832.71	888.00	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	53.47	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	69.69	0.5
	55.57	86.09	133.81	161.45	193.23	5
	555.72	848.97	963.46	1038.60	1115.50	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	69.90	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	89.10	0.5
	55.57	86.09	143.92	195.93	237.70	5
	555.72	848.97	1149.52	1247.41	1348.05	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	110.93	0.5
	55.57	86.09	143.92	232.05	284.90	5
	555.72	848.97	1336.94	1459.22	1585.55	50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0$

$\phi_2 = 20^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	1	1	2	3.5	0.05
	1	1.5	2	2.5	4	0.5
	1.5	2	3	4	6	5
	2	2.5	4	5.5	8	50



7-5

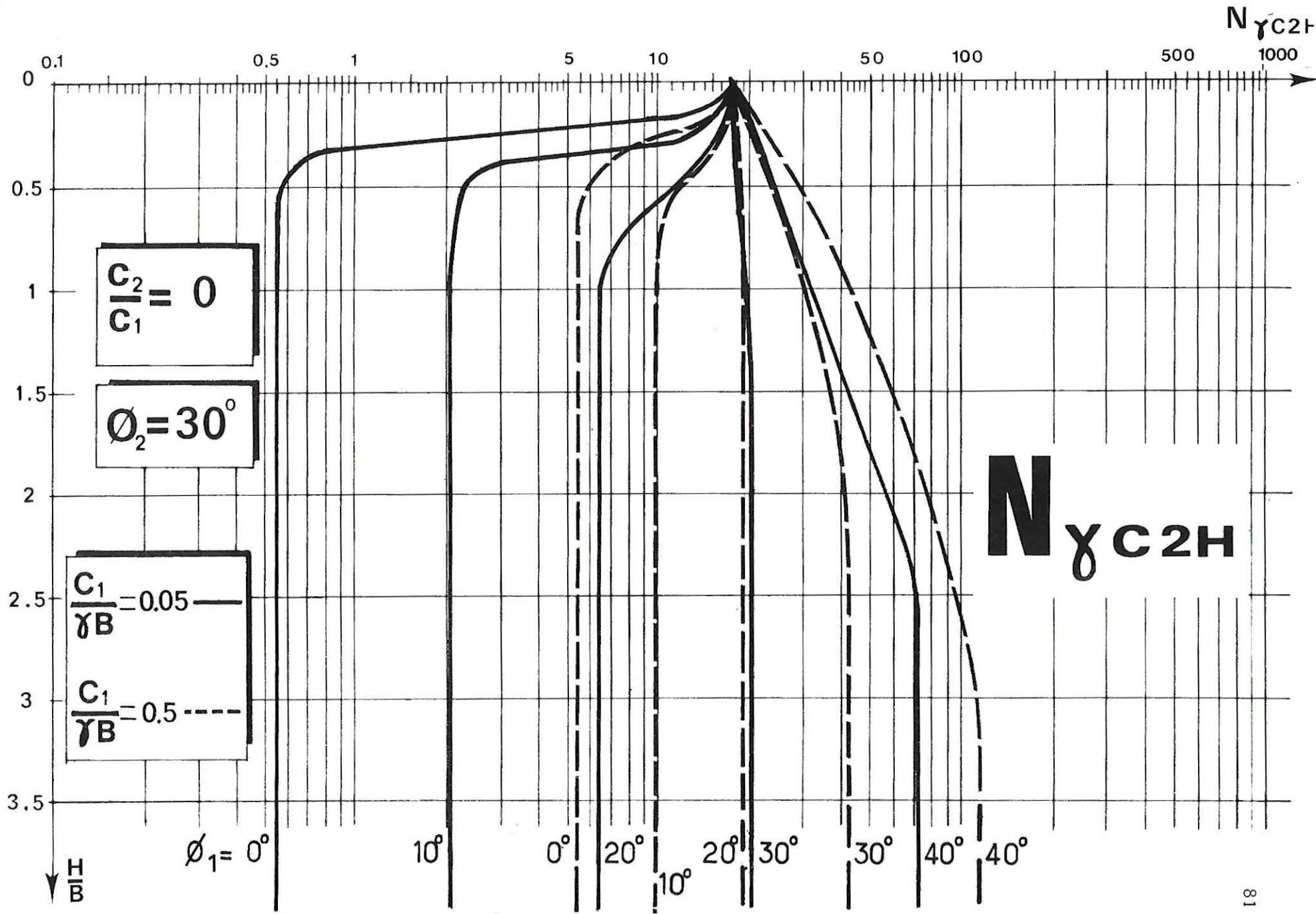
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	17.70	17.70	17.70	17.70	17.70	0.05
	17.70	17.70	17.70	17.70	17.70	0.5
	17.70	17.70	17.70	17.70	17.70	5
	17.70	17.70	17.70	17.70	17.70	50
0.1	14.50	15.58	16.66	17.84	19.02	0.05
	15.74	16.77	17.91	19.09	20.19	0.5
	25.75	26.84	27.98	29.11	30.12	5
	92.74	94.26	95.72	97.22	98.75	50
0.2	11.22	13.50	15.69	17.97	20.33	0.05
	13.91	15.98	18.10	20.35	22.55	0.5
	31.88	33.95	36.12	38.43	40.71	5
	149.59	153.16	156.83	160.56	164.28	50
0.3	0.77	11.22	14.69	18.11	21.64	0.05
	7.71	15.19	18.28	21.58	25.02	0.5
	36.88	40.11	43.47	47.09	50.76	5
	200.81	207.12	213.38	219.82	226.33	50
0.4	0.61	2.71	13.63	18.25	23.01	0.05
	6.19	14.32	18.44	22.78	27.58	0.5
	41.24	45.67	50.39	55.18	60.35	5
	248.45	257.78	267.23	276.83	286.52	50
0.5	0.57	2.20	12.40	18.40	24.55	0.05
	5.72	12.09	18.58	23.99	29.91	0.5
	45.14	50.79	56.72	63.06	69.83	5
	293.64	306.42	319.35	332.45	345.75	50
1	0.55	2.02	6.42	19.38	32.67	0.05
	5.55	9.82	19.22	30.28	43.02	0.5
	55.57	72.34	85.70	100.38	116.32	5
	494.08	530.07	565.30	600.62	636.39	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	42.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	37.39	57.79	0.5
	55.57	86.09	112.22	136.57	164.12	5
	555.72	731.64	796.05	859.74	924.10	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	55.23	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	74.50	0.5
	55.57	86.09	138.31	173.06	212.99	5
	555.72	848.97	1019.94	1116.74	1214.40	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	93.76	0.5
	55.57	86.09	143.92	210.42	264.40	5
	555.72	848.97	1240.37	1373.80	1508.60	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	115.39	0.5
	55.57	86.09	143.92	249.41	318.54	5
	555.72	848.97	1387.54	1632.04	1807.27	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	375.42	5
	555.72	848.97	1387.54	1892.10	2110.55	50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0$

$\phi_2 = 30^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	1	1	1.5	2.5	0.05
	1	1	1	2	3.5	0.5
	1	1.5	2.5	3.5	5	5
	1.5	2	3	5	7	50



$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	66.43	66.43	66.43	66.43	66.43	0.05
	66.43	66.43	66.43	66.43	66.43	0.5
	66.43	66.43	66.43	66.43	66.43	5
	66.43	66.43	66.43	66.43	66.43	50
0.1	54.70	57.68	60.73	63.68	66.61	0.05
	56.43	59.32	62.43	65.22	68.21	0.5
	65.45	74.16	77.22	80.06	83.08	5
	180.15	183.57	187.10	190.74	194.23	50
0.2	43.32	49.06	54.81	60.89	66.79	0.05
	46.64	52.67	58.13	64.07	70.01	0.5
	64.21	80.37	86.04	92.16	98.17	5
	264.14	271.86	279.72	287.81	296.16	50
0.3	0.77	40.54	49.09	57.94	66.97	0.05
	7.71	45.59	54.01	62.89	71.83	0.5
	63.07	85.43	93.94	102.93	112.02	5
	336.25	349.56	362.97	376.54	390.13	50
0.4	0.61	2.71	43.26	54.99	67.16	0.05
	6.19	16.14	50.00	61.55	73.68	0.5
	61.95	86.09	101.00	112.74	125.16	5
	401.48	420.47	439.76	459.38	479.36	50
0.5	0.57	2.20	26.23	52.48	67.35	0.05
	5.72	12.09	46.07	60.29	75.38	0.5
	57.21	86.09	107.28	122.17	138.08	5
	460.81	486.51	512.51	539.02	565.99	50
1	0.55	2.02	6.42	23.87	68.37	0.05
	5.55	9.82	19.74	53.41	84.33	0.5
	55.57	86.09	132.02	163.75	198.38	5
	555.72	767.80	837.72	907.13	977.43	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	69.70	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	94.12	0.5
	55.57	86.09	143.92	200.44	255.81	5
	555.72	848.97	1122.35	1247.21	1371.19	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	105.71	0.5
	55.57	86.09	143.92	235.00	312.98	5
	555.72	848.97	1377.66	1568.93	1755.98	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	371.85	5
	555.72	848.97	1387.54	1881.34	2138.59	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	432.03	5
	555.72	848.97	1387.54	2188.45	2521.19	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	494.43	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	2905.51	50
$\frac{H}{B} \geq (\frac{H}{B})_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

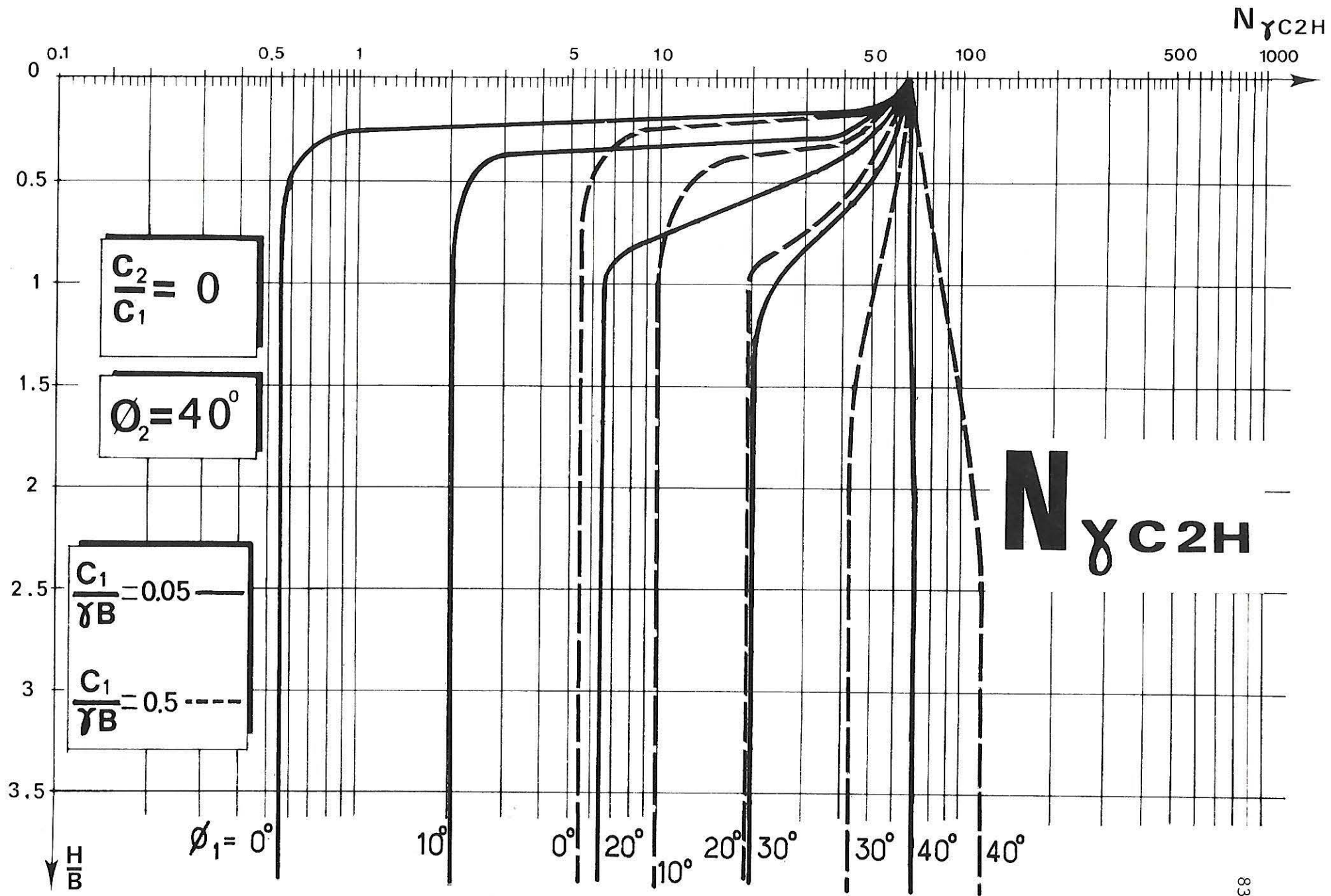
$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0$

$\phi_2 = 40^\circ$

5

$(\frac{H}{B})_{lim}$	1	1	1	1.5	2	0.05
	1	1	1.5	1.5	2.5	0.5
	1	1	1.5	2.5	4.5	5
	1	1.5	2.5	3.5	6	50



$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	0.27 2.77 27.78 277.86	0.27 2.77 27.78 277.86	0.27 2.77 27.78 277.86	0.27 2.77 27.78 277.86	0.27 2.77 27.78 277.86	0.05 0.5 5 50
0.1	0.30 3.02 30.26 302.60	0.37 3.14 30.91 308.56	0.45 3.30 31.89 317.80	0.53 3.46 32.85 326.80	0.61 3.62 33.82 335.81	0.05 0.5 5 50
0.2	0.32 3.28 32.87 328.75	0.47 3.53 34.15 340.38	0.64 3.86 36.15 359.12	0.82 4.17 37.82 374.38	1.01 4.51 39.66 391.31	0.05 0.5 5 50
0.3	0.35 3.53 35.37 353.78	0.58 3.92 37.33 371.48	0.85 4.40 40.05 396.60	1.15 4.93 42.81 421.84	1.48 5.45 45.40 445.23	0.05 0.5 5 50
0.4	0.37 3.78 37.80 378.02	0.70 4.30 40.45 401.97	1.08 4.98 44.08 435.27	1.52 5.69 47.63 467.30	2.00 6.45 51.16 498.78	0.05 0.5 5 50
0.5	0.40 4.04 40.44 404.46	0.82 4.71 43.65 433.16	1.33 5.57 48.06 473.29	1.92 6.50 52.49 512.84	2.58 7.50 56.92 551.76	0.05 0.5 5 50
1	0.51 5.16 51.62 516.26	1.56 6.83 59.62 587.74	2.89 8.82 68.24 663.15	4.49 11.06 77.15 738.81	6.38 13.60 86.09 812.62	0.05 0.5 5 50
1.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.20 76.07 745.39	5.00 12.61 89.01 854.31	8.05 16.59 102.48 963.37	11.70 21.18 116.51 1072.68	0.05 0.5 5 50
2	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 17.01 110.61 1048.54	12.66 23.17 129.02 1191.01	18.64 30.38 148.60 1335.43	0.05 0.5 5 50
2.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 133.04 1246.34	18.33 30.83 156.80 1421.89	27.19 41.21 182.34 1600.98	0.05 0.5 5 50
3	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 39.57 185.75 1654.69	37.35 53.65 217.81 1868.59	0.05 0.5 5 50
3.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 215.83 1889.22	49.14 67.72 254.89 2138.45	0.05 0.5 5 50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	71.79 118.47 560.56 4933.70	0.05 0.5 5 50

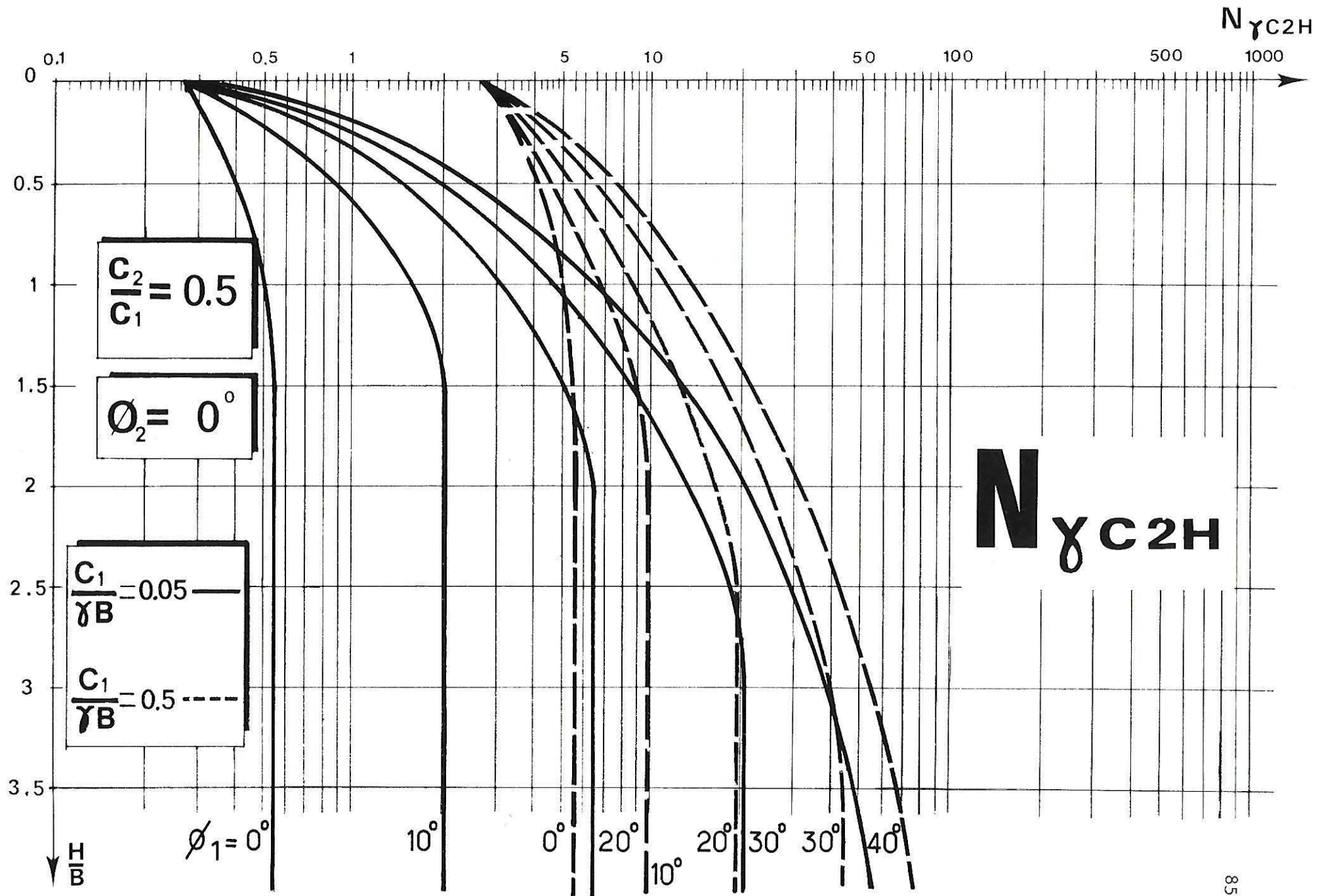
$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0.5$

$\phi_2 = 0^\circ$

5

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1.5	1.5	2	3	4.5	0.05
	1.5	2	2.5	3.5	5	0.5
	1.5	2	3	4	7	5
	1.5	2	3	5	8	50



7-5

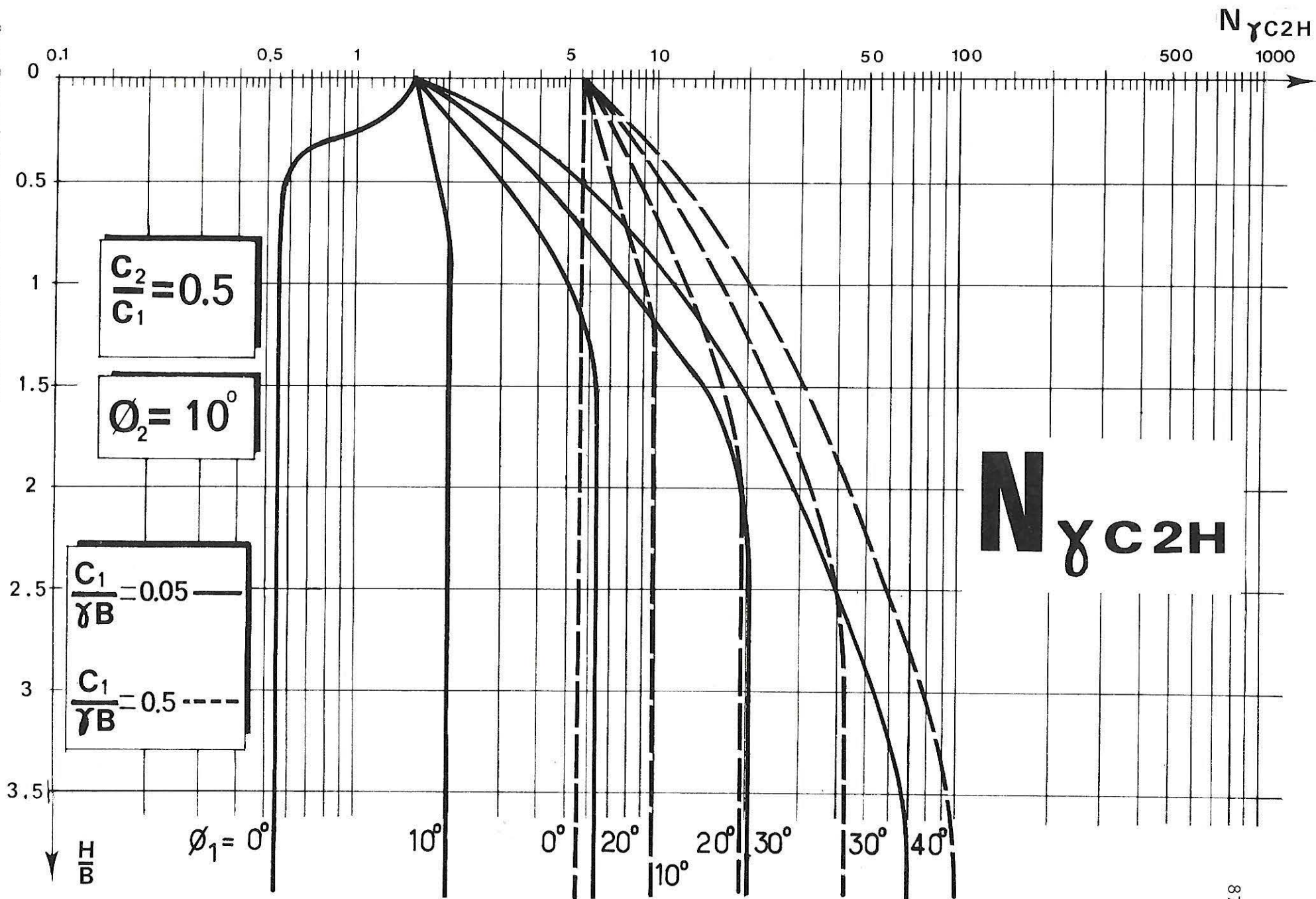
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	1.56 5.52 43.72 425.15	1.56 5.52 43.72 425.15	1.56 5.52 43.72 425.15	1.56 5.52 43.72 425.15	1.56 5.52 43.72 425.15	0.05 0.5 5 50
0.1	1.39 5.53 45.04 439.48	1.65 5.85 46.47 451.90	1.82 6.15 47.86 464.68	2.03 6.45 49.34 477.47	2.25 6.76 50.71 489.09	0.05 0.5 5 50
0.2	1.25 5.54 46.34 453.43	1.65 6.17 49.17 478.94	2.09 6.77 52.01 503.31	2.54 7.41 54.78 528.30	2.98 8.07 57.60 551.98	0.05 0.5 5 50
0.3	0.78 5.55 47.62 466.98	1.71 6.48 51.96 505.50	2.37 7.42 56.14 542.49	3.05 8.39 60.27 577.46	3.78 9.44 64.31 612.93	0.05 0.5 5 50
0.4	0.61 5.55 48.89 480.51	1.76 6.80 54.63 531.86	2.68 8.08 60.31 580.56	3.62 9.44 65.67 627.98	4.68 10.81 71.08 673.18	0.05 0.5 5 50
0.5	0.57 5.55 50.15 494.18	1.82 7.13 57.42 558.77	3.01 8.75 64.29 618.55	4.21 10.46 71.12 676.73	5.57 12.31 77.97 732.48	0.05 0.5 5 50
1	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.05 71.91 698.89	4.89 12.46 85.41 813.64	7.82 16.35 98.96 921.79	11.24 20.71 112.71 1030.00	0.05 0.5 5 50
1.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.39 16.83 107.64 1011.25	14.40 23.34 128.02 1170.01	18.73 30.92 149.35 1327.63	0.05 0.5 5 50
2	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 130.73 1214.92	18.47 31.52 158.31 1419.85	28.17 43.06 187.72 1626.80	0.05 0.5 5 50
2.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 41.09 190.25 1674.57	39.72 57.28 228.48 1931.01	0.05 0.5 5 50
3	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 223.92 1933.33	53.31 73.61 271.50 2238.08	0.05 0.5 5 50
3.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 258.96 2195.10	69.02 92.00 316.72 2548.93	0.05 0.5 5 50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	71.79 118.47 560.56 4933.70	0.05 0.5 5 50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0.5$

$\phi_2 = 10^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.3	1	2	2.5	4	0.05
	1	1.5	2	3	4.5	0.5
	1	1.5	2.5	4	6	5
	1	1.5	2.5	4.5	7.5	50



7-5

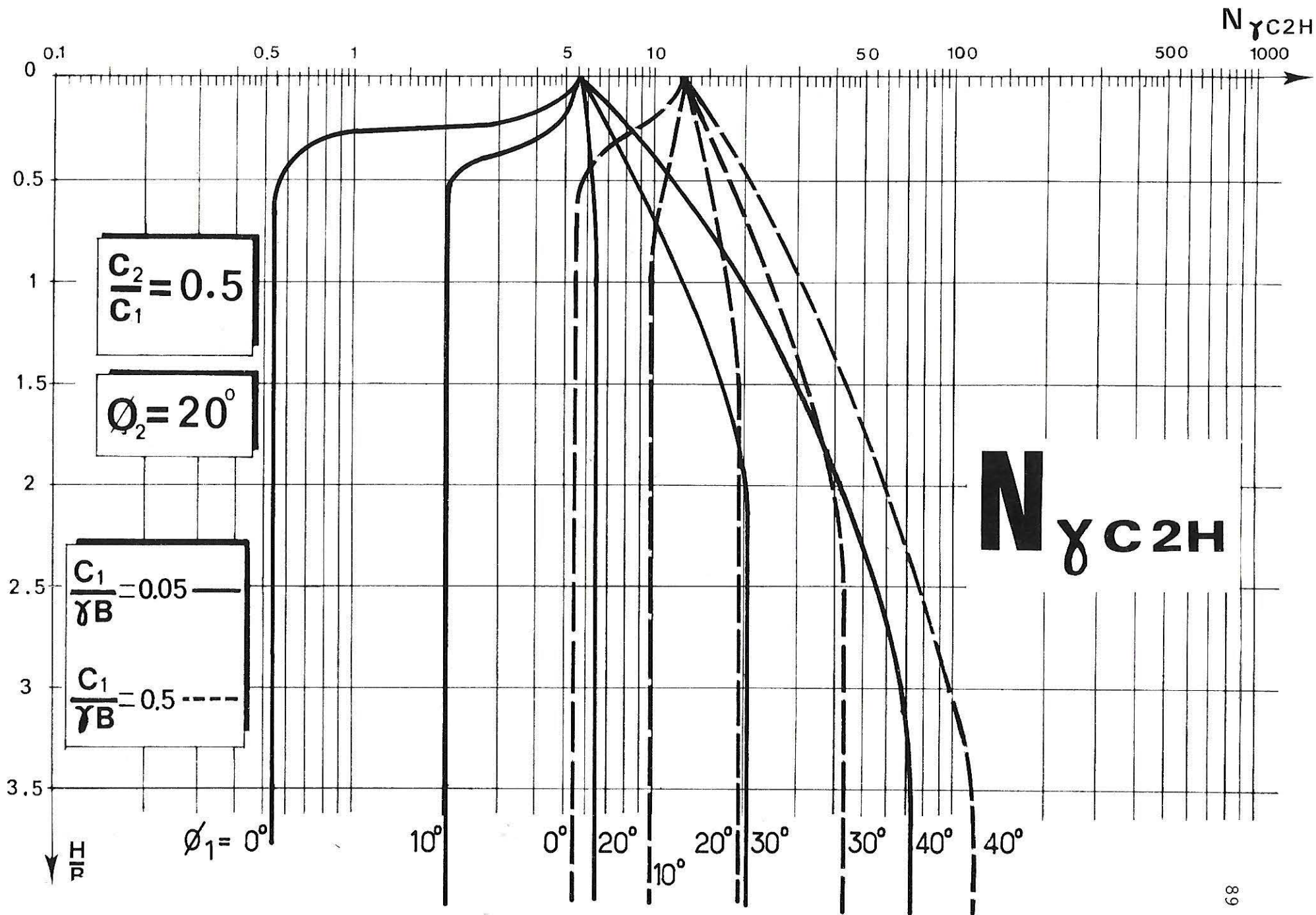
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	0.05
	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	0.5
	74.87	74.87	74.87	74.87	74.87	5
	696.70	696.70	696.70	696.70	696.70	50
0.1	4.78	5.17	5.70	6.19	6.67	0.05
	11.41	12.01	12.63	13.23	14.01	0.5
	73.64	76.02	78.15	80.32	82.54	5
	693.60	711.15	728.86	747.38	766.46	50
0.2	3.74	4.82	5.72	6.74	7.75	0.05
	10.52	11.82	13.04	14.33	15.66	0.5
	72.47	77.13	81.51	86.06	90.48	5
	686.90	725.28	761.83	798.80	832.81	50
0.3	0.77	4.23	5.78	7.31	8.97	0.05
	7.71	11.62	13.46	15.46	17.41	0.5
	71.17	78.20	84.91	91.72	98.23	5
	680.53	739.15	794.93	847.55	900.50	50
0.4	0.61	2.60	5.84	7.92	10.13	0.05
	6.19	11.35	13.90	16.54	19.33	0.5
	61.95	79.26	88.43	97.22	106.08	5
	619.50	752.83	828.05	899.03	967.84	50
0.5	0.57	2.20	5.96	8.67	11.52	0.05
	5.72	11.09	14.36	17.68	21.22	0.5
	57.21	80.30	91.88	103.08	114.10	5
	572.19	766.42	859.41	948.39	1033.65	50
1	0.55	2.02	6.42	12.43	18.91	0.05
	5.55	9.82	16.94	24.08	31.92	0.5
	55.57	85.93	109.92	132.26	154.97	5
	555.72	835.90	1027.68	1201.32	1367.33	50
1.5	0.55	2.02	6.42	17.52	28.43	0.05
	5.55	9.82	19.22	31.72	44.67	0.5
	55.57	86.09	130.09	163.11	197.40	5
	555.72	848.97	1210.86	1459.89	1702.94	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	40.17	0.05
	5.55	9.82	19.22	40.62	59.56	0.5
	55.57	86.09	143.92	195.97	242.56	5
	555.72	848.97	1409.84	1725.96	2041.69	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	54.10	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	76.65	0.5
	55.57	86.09	143.92	230.51	290.18	5
	555.72	848.97	1387.54	1997.49	2385.47	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	70.53	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	96.23	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	340.52	5
	555.72	848.97	1387.54	2275.79	2734.48	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	393.65	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3088.55	50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0.5$

$\phi_2 = 20^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	1	1	2	3.5	0.05
	1	1	1.5	2.5	3.5	0.5
	1	1.5	2	3	5	5
	1	1.5	2.5	3.5	6	50



$N_{\gamma C2H}$

7-5

7-5

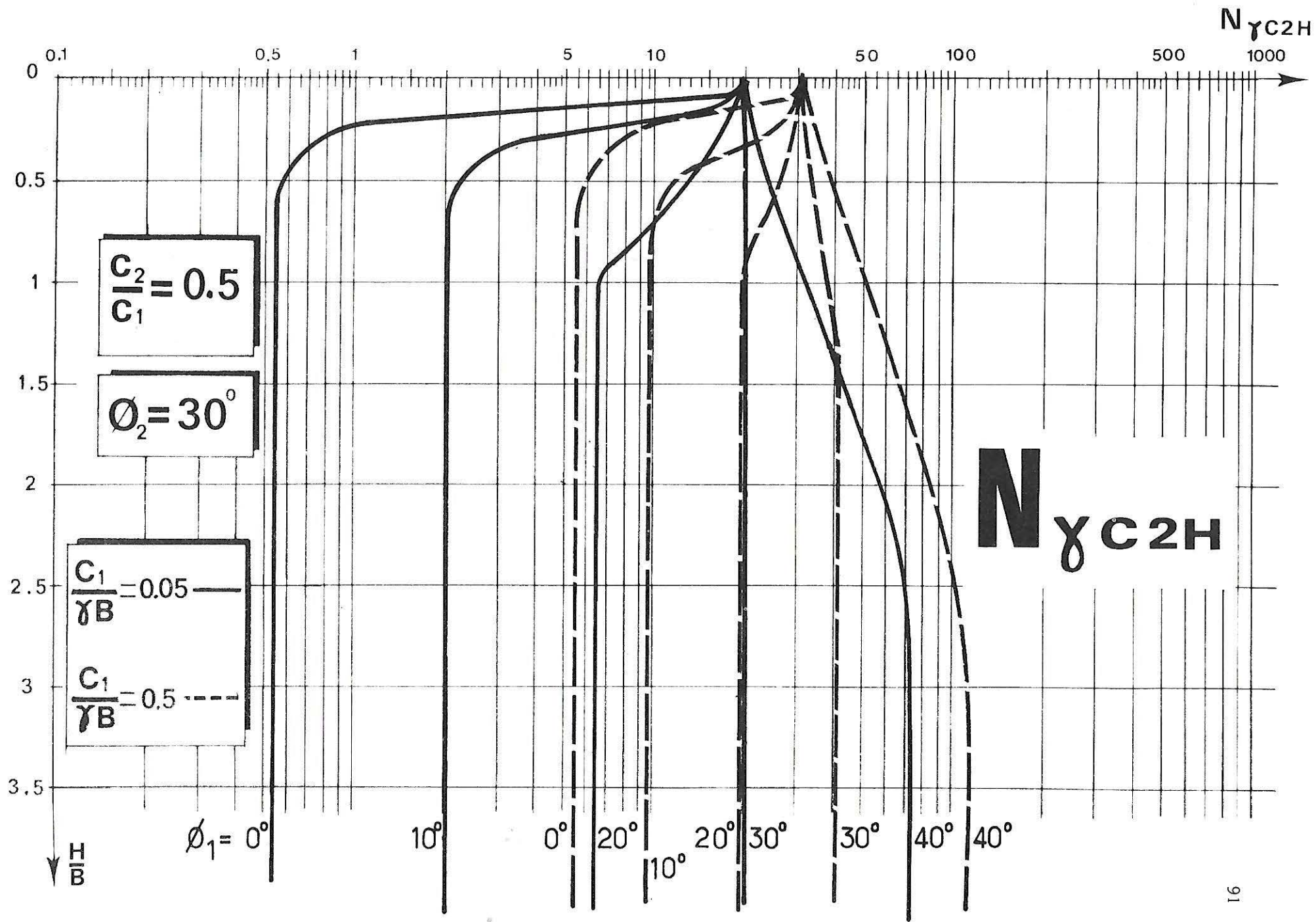
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	19.05	19.05	19.05	19.05	19.05	0.05
	30.82	30.82	30.82	30.82	30.82	0.5
	142.24	142.24	142.24	142.24	142.24	5
	1243.06	1243.06	1243.06	1243.06	1243.06	50
0.1	15.71	16.79	18.19	19.12	20.33	0.05
	27.27	28.72	30.03	31.37	32.76	0.5
	135.26	139.10	142.87	146.83	150.71	5
	1199.28	1229.31	1256.95	1284.99	1314.18	50
0.2	1.19	14.64	16.83	19.19	21.56	0.05
	11.93	26.46	29.26	31.93	34.86	0.5
	119.37	136.00	143.48	151.43	158.95	5
	1154.90	1211.79	1270.46	1327.59	1384.40	50
0.3	0.77	3.85	15.74	19.26	22.83	0.05
	7.78	24.26	28.46	32.52	36.91	0.5
	77.85	132.16	143.92	155.78	167.66	5
	778.54	1195.34	1283.64	1370.98	1453.74	50
0.4	0.61	2.71	14.59	19.33	24.24	0.05
	6.19	15.57	27.51	33.13	38.92	0.5
	61.95	128.46	143.92	160.23	176.02	5
	619.50	1175.23	1296.37	1412.25	1523.61	50
0.5	0.57	2.20	13.21	19.39	25.68	0.05
	5.72	12.09	26.61	33.76	41.10	0.5
	57.21	111.17	143.92	164.78	184.51	5
	572.19	1101.99	1307.61	1454.02	1591.89	50
1	0.55	2.02	6.42	19.89	33.68	0.05
	5.55	9.82	19.74	37.06	52.77	0.5
	55.57	86.09	143.92	188.26	228.39	5
	555.72	848.97	1361.67	1665.37	1944.38	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.40	43.53	0.05
	5.55	9.82	19.22	41.52	66.39	0.5
	55.57	86.09	143.92	213.87	274.74	5
	555.72	848.97	1387.54	1891.89	2300.43	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	55.90	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	82.30	0.5
	55.57	86.09	143.92	243.08	323.73	5
	555.72	848.97	1387.54	2134.45	2667.37	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	100.94	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	376.41	5
	555.72	848.97	1387.54	2398.32	3042.05	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	431.43	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3422.51	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	489.86	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3810.94	50
$\frac{H}{B} \geq (\frac{H}{B})_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0.5$

$\phi_2 = 30^\circ$

$(\frac{H}{B})_{lim}$	1	1	1	1.5	2.5	0.05
	1	1	1.5	2	3	0.5
	1	1	1.5	2.5	4	5
	1	1	1.5	3	5	50



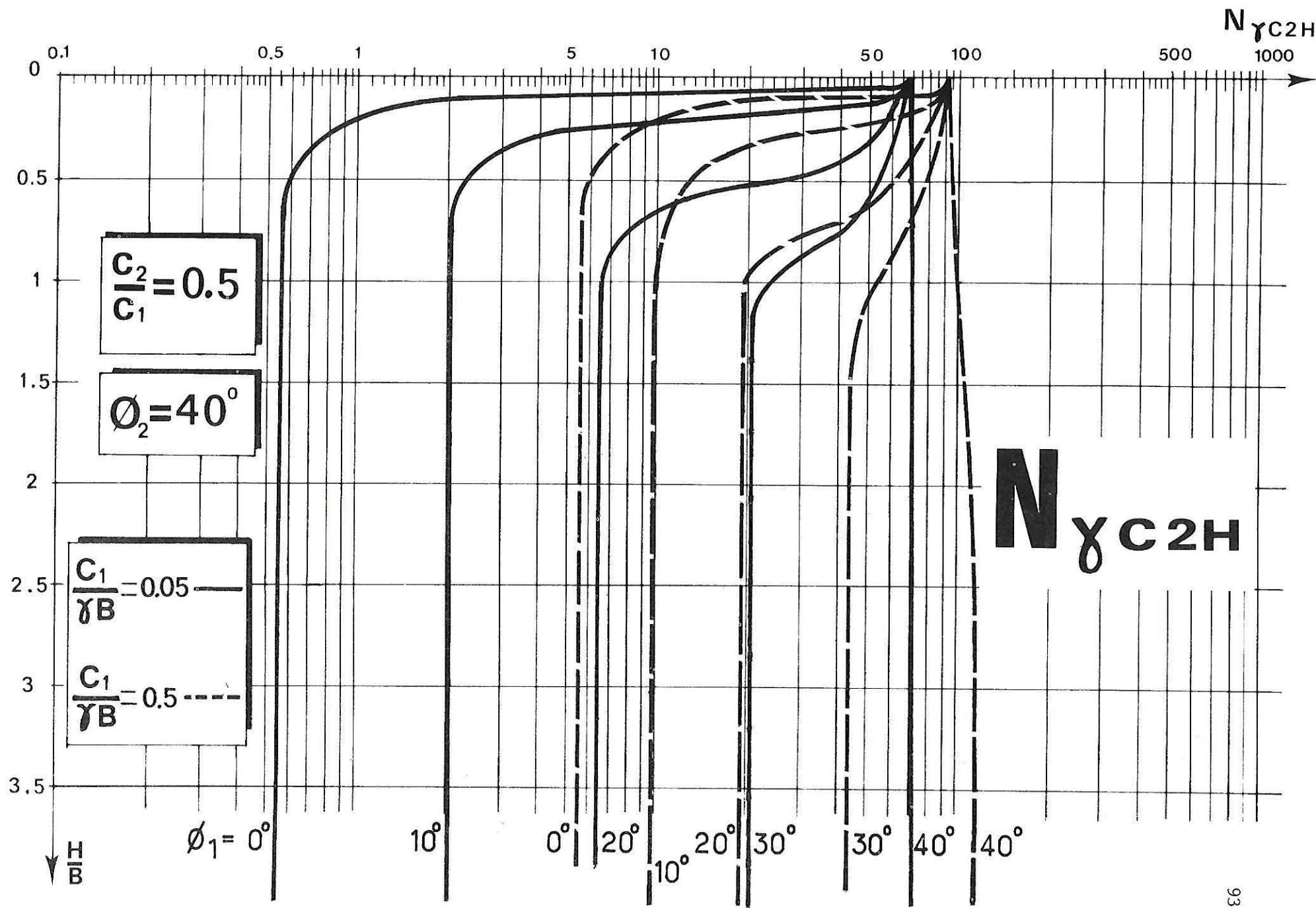
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	69.11	69.11	69.11	69.11	69.11	0.05
	92.81	92.81	92.81	92.81	92.81	0.5
	316.83	316.83	316.83	316.83	316.83	5
	2504.82	2504.82	2504.82	2504.82	2504.82	50
0.1	2.31	60.14	63.30	66.18	69.20	0.05
	23.15	83.13	86.57	90.25	93.60	0.5
	231.53	300.13	307.65	315.51	323.07	5
	2315.36	2416.07	2466.70	2502.69	2563.10	50
0.2	1.19	22.62	57.17	63.35	69.29	0.05
	11.93	73.84	80.61	87.37	94.39	0.5
	119.37	283.19	298.92	314.05	329.36	5
	1193.70	2325.20	2424.16	2500.60	2621.90	50
0.3	0.77	3.85	51.29	60.21	69.38	0.05
	7.78	25.26	74.53	84.63	95.20	0.5
	77.85	265.90	289.66	312.62	335.72	5
	778.54	2233.00	2383.09	2498.53	2680.45	50
0.4	0.61	2.71	45.16	57.14	69.48	0.05
	6.19	16.14	68.42	82.03	96.02	0.5
	61.95	150.42	279.83	311.23	342.14	5
	619.50	1493.25	2337.18	2496.45	2737.36	50
0.5	0.57	2.20	26.23	54.49	69.57	0.05
	5.72	12.09	62.14	79.42	96.86	0.5
	57.21	111.17	270.01	309.87	348.65	5
	572.19	1101.99	2293.42	2494.31	2794.96	50
1	0.55	2.02	6.42	23.87	70.08	0.05
	5.55	9.82	19.74	54.18	101.35	0.5
	55.57	86.09	155.62	300.35	381.31	5
	555.72	848.97	1508.62	2485.59	3088.62	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	70.75	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	106.60	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	416.22	5
	555.72	848.97	1387.54	2475.90	3385.46	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	113.21	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	453.86	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3695.90	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	496.05	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4025.73	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	547.15	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4382.83	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4758.26	50
$\frac{H}{B} \cong 4$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 0.5$

$\phi_2 = 40^\circ$



7-5

7-5

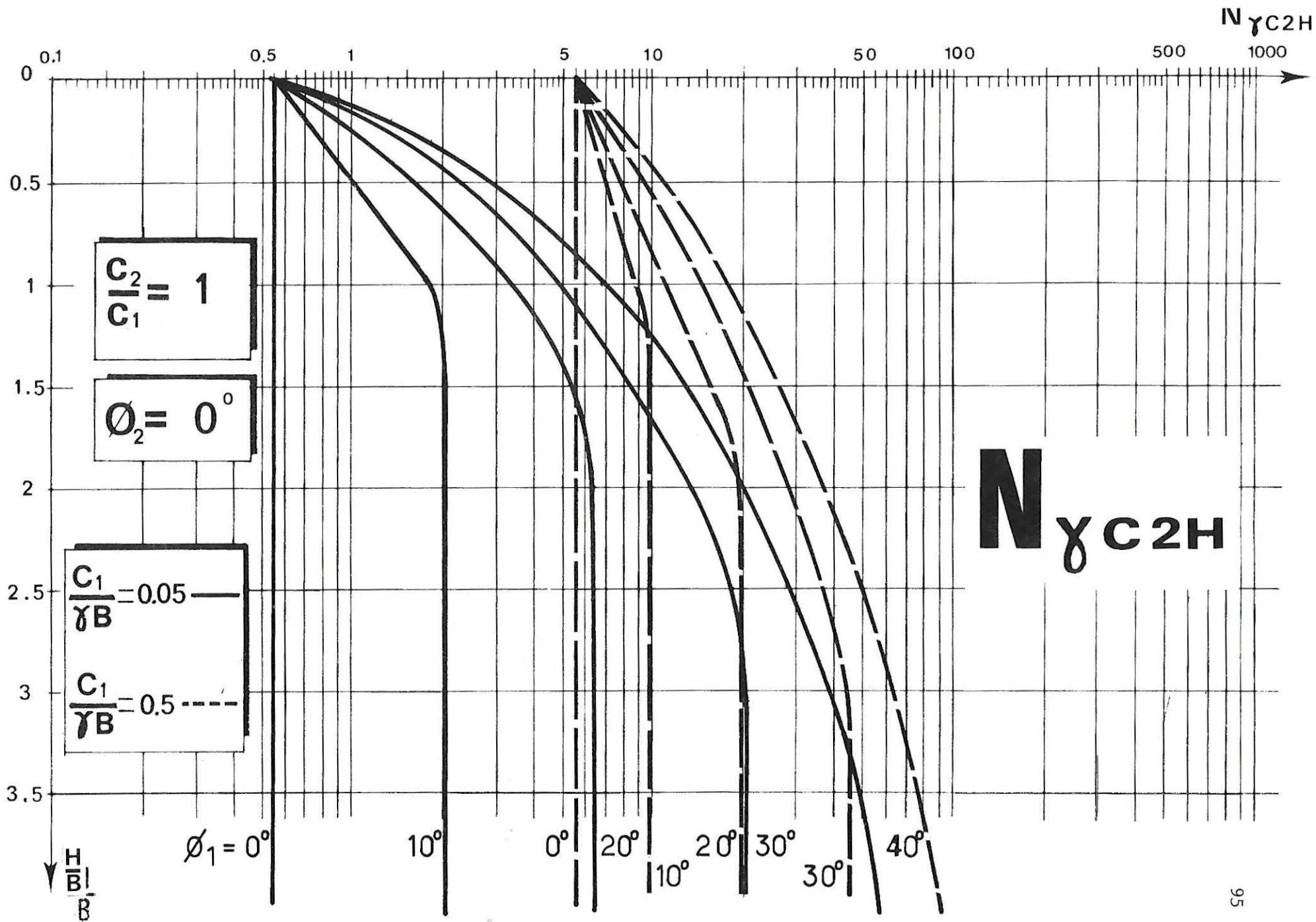
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.05
	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55	0.5
	55.57	55.57	55.57	55.57	55.57	5
	555.72	555.72	555.72	555.72	555.72	50
0.1	0.55	0.63	0.72	0.81	0.90	0.05
	5.55	5.78	6.02	6.27	6.53	0.5
	55.57	57.24	59.13	61.01	62.91	5
	555.72	571.88	590.18	608.37	626.75	50
0.2	0.55	0.72	0.91	1.11	1.32	0.05
	5.55	6.04	6.55	7.07	7.56	0.5
	55.57	59.21	63.08	66.84	70.23	5
	555.72	591.01	628.40	664.58	696.97	50
0.3	0.55	0.82	1.12	1.44	1.80	0.05
	5.55	6.31	7.12	7.86	8.66	0.5
	55.57	61.32	67.05	72.23	77.63	5
	555.72	611.38	666.66	716.13	767.56	50
0.4	0.55	0.93	1.35	1.82	2.33	0.05
	5.55	6.61	7.64	8.71	9.77	0.5
	55.57	63.47	70.79	77.97	84.67	5
	555.72	632.17	702.42	770.77	833.98	50
0.5	0.55	1.05	1.60	2.22	2.92	0.05
	5.55	6.93	8.23	9.57	10.96	0.5
	55.57	65.86	74.81	83.40	91.88	5
	555.72	655.15	740.81	822.10	901.58	50
1	0.55	1.76	3.16	4.84	6.79	0.05
	5.55	8.71	11.54	14.51	17.74	0.5
	55.57	78.15	95.36	111.97	128.22	5
	555.72	772.80	937.55	1087.37	1234.86	50
1.5	0.55	2.02	5.28	8.42	12.17	0.05
	5.55	9.82	15.46	20.44	26.01	0.5
	55.57	86.09	117.66	141.60	165.95	5
	555.72	848.97	1140.73	1355.48	1569.10	50
2	0.55	2.02	6.42	13.07	19.17	0.05
	5.55	9.82	19.22	27.40	35.86	0.5
	55.57	86.09	140.78	172.46	205.06	5
	555.72	848.97	1349.68	1626.31	1903.65	50
2.5	0.55	2.02	6.42	18.80	27.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	35.52	47.36	0.5
	55.57	86.09	143.92	204.72	246.13	5
	555.72	848.97	1387.54	1902.63	2243.86	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	38.03	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	60.51	0.5
	55.57	86.09	143.92	238.61	289.02	5
	555.72	848.97	1387.54	2185.71	2588.02	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	49.89	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	75.31	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	333.64	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	2935.28	50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 1$

$\phi_2 = 0^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0	1.5	2	3	4.5	0.05
	0	1.5	2	3	5	0.5
	0	1.5	2.5	3.5	6	5
	0	1.5	2.5	3.5	6.5	5
	0	1.5	2.5	3.5	6.5	50



7-5

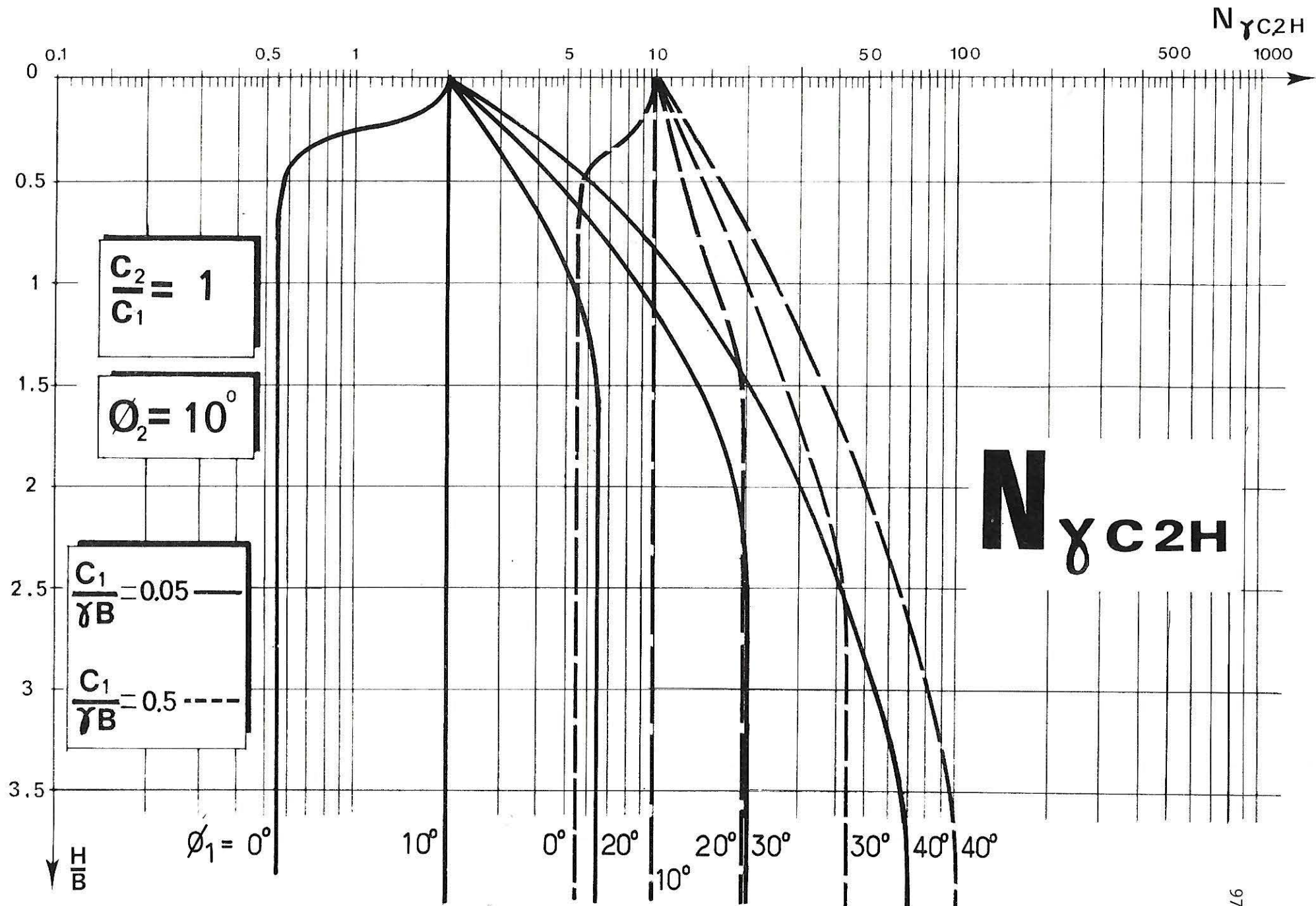
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	0.05
	9.82	9.82	9.82	9.82	9.82	0.5
	86.09	86.09	86.09	86.09	86.09	5
	848.97	848.97	848.97	848.97	848.97	50
0.1	1.80	2.02	2.25	2.47	2.70	0.05
	9.35	9.82	10.23	10.65	11.09	0.5
	83.47	86.09	88.76	91.49	94.22	5
	823.86	848.97	873.95	900.04	926.96	50
0.2	1.55	2.02	2.48	2.96	3.43	0.05
	8.87	9.82	10.67	11.65	12.48	0.5
	80.49	86.09	91.59	97.07	102.01	5
	796.55	848.97	900.94	951.48	997.41	50
0.3	0.77	2.02	2.74	3.46	4.22	0.05
	8.33	9.82	11.14	12.53	13.88	0.5
	76.98	86.09	94.69	102.23	110.15	5
	763.28	848.97	929.18	999.50	1072.06	50
0.4	0.61	2.02	3.03	4.04	5.08	0.05
	6.19	9.82	11.65	13.48	15.39	0.5
	61.95	86.09	97.43	107.78	117.83	5
	619.50	848.97	954.31	1051.68	1142.55	50
0.5	0.57	2.02	3.29	4.61	6.04	0.05
	5.72	9.82	12.19	14.51	16.91	0.5
	57.21	86.09	100.17	113.32	125.89	5
	572.19	848.97	980.15	1101.30	1215.33	50
1	0.55	2.02	5.11	8.19	11.72	0.05
	5.55	9.82	15.20	20.28	25.74	0.5
	55.57	86.09	116.41	141.70	166.44	5
	555.72	848.97	1129.37	1356.87	1575.83	50
1.5	0.55	2.02	6.42	12.90	19.28	0.05
	5.55	9.82	19.22	27.30	36.39	0.5
	55.57	86.09	135.70	172.28	208.93	5
	555.72	848.97	1302.35	1625.33	1937.11	50
2	0.55	2.02	6.42	18.85	28.72	0.05
	5.55	9.82	19.22	35.54	48.95	0.5
	55.57	86.09	143.92	205.06	253.28	5
	555.72	848.97	1387.54	1904.03	2304.36	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	40.32	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	63.56	0.5
	55.57	86.09	143.92	239.35	299.94	5
	555.72	848.97	1387.54	2187.01	2673.67	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	53.94	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	80.41	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	349.11	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3052.25	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	69.71	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	99.28	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	400.53	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3434.24	50
$\frac{H}{B} \cong \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 1$

$\phi_2 = 10^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	0	1.5	2.5	4	0.05
	1	0	1.5	2.5	4.5	0.5
	1	0	2	3	5	5
	1	0	2	3	5.5	50



7-5

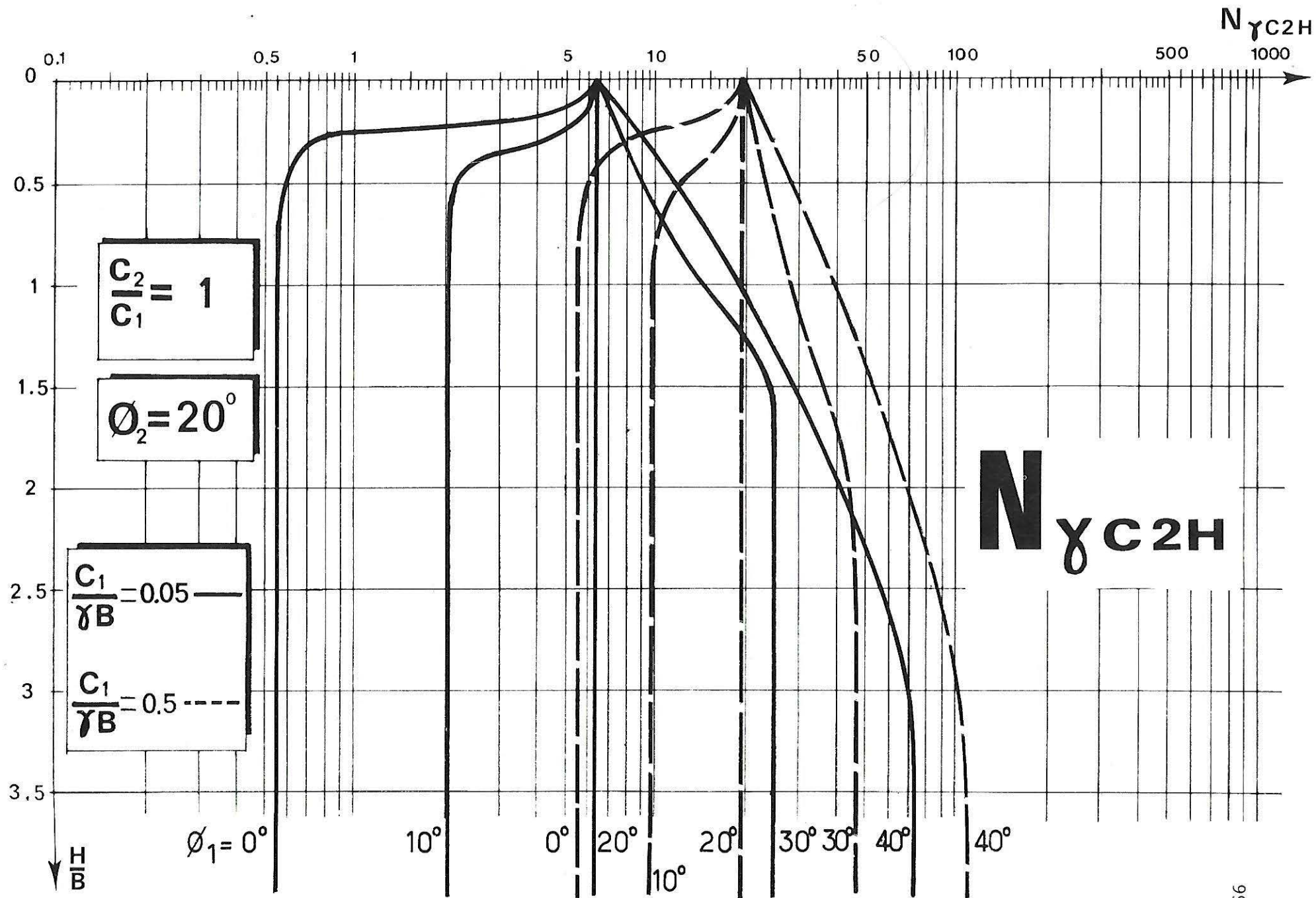
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	6.42	6.42	6.42	6.42	6.42	0.05
	19.22	19.22	19.22	19.22	19.22	0.5
	143.92	143.92	143.92	143.92	143.92	5
	1387.54	1387.54	1387.54	1387.54	1387.54	50
0.1	5.47	5.95	6.42	6.92	7.40	0.05
	17.65	18.43	19.22	20.07	20.95	0.5
	135.63	139.90	143.92	147.82	151.77	5
	1313.77	1352.68	1387.54	1422.67	1459.47	50
0.2	4.28	5.44	6.42	7.42	8.45	0.05
	15.92	17.62	19.22	20.97	22.57	0.5
	127.00	135.53	143.92	151.85	160.11	5
	1234.53	1312.83	1387.54	1460.21	1532.13	50
0.3	0.77	4.76	6.42	7.96	9.60	0.05
	7.71	16.73	19.22	21.81	24.30	0.5
	77.19	131.01	143.92	156.20	168.00	5
	771.95	1272.47	1387.54	1499.16	1601.62	50
0.4	0.61	2.60	6.42	8.53	10.82	0.05
	6.19	15.71	19.22	22.66	26.17	0.5
	61.95	126.36	143.92	160.45	176.22	5
	619.50	1228.56	1387.54	1535.27	1674.71	50
0.5	0.57	2.20	6.42	9.26	12.20	0.05
	5.72	12.09	19.22	23.58	28.04	0.5
	57.21	111.17	143.92	164.68	184.30	5
	572.19	1101.99	1387.54	1571.19	1744.99	50
1	0.55	2.02	6.42	12.91	19.55	0.05
	5.55	9.82	19.22	28.94	38.57	0.5
	55.57	86.09	143.92	187.25	226.92	5
	555.72	848.97	1387.54	1770.22	2109.02	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	29.02	0.05
	5.55	9.82	19.22	35.72	51.27	0.5
	55.57	86.09	143.92	213.53	272.07	5
	555.72	848.97	1387.54	1990.73	2477.22	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	40.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	66.22	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	320.05	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	2860.40	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	54.74	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	83.33	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	371.21	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3250.74	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.16	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	103.11	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	424.76	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3648.44	50
$\frac{H}{B} \approx \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	481.48	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4057.25	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 1$

$\phi_2 = 20^\circ$

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	1	0	1.5	3.5	0.05
	1	1	0	2	3.5	0.5
	1	1	0	2	4.5	5
	1	1	0	2	4.5	50



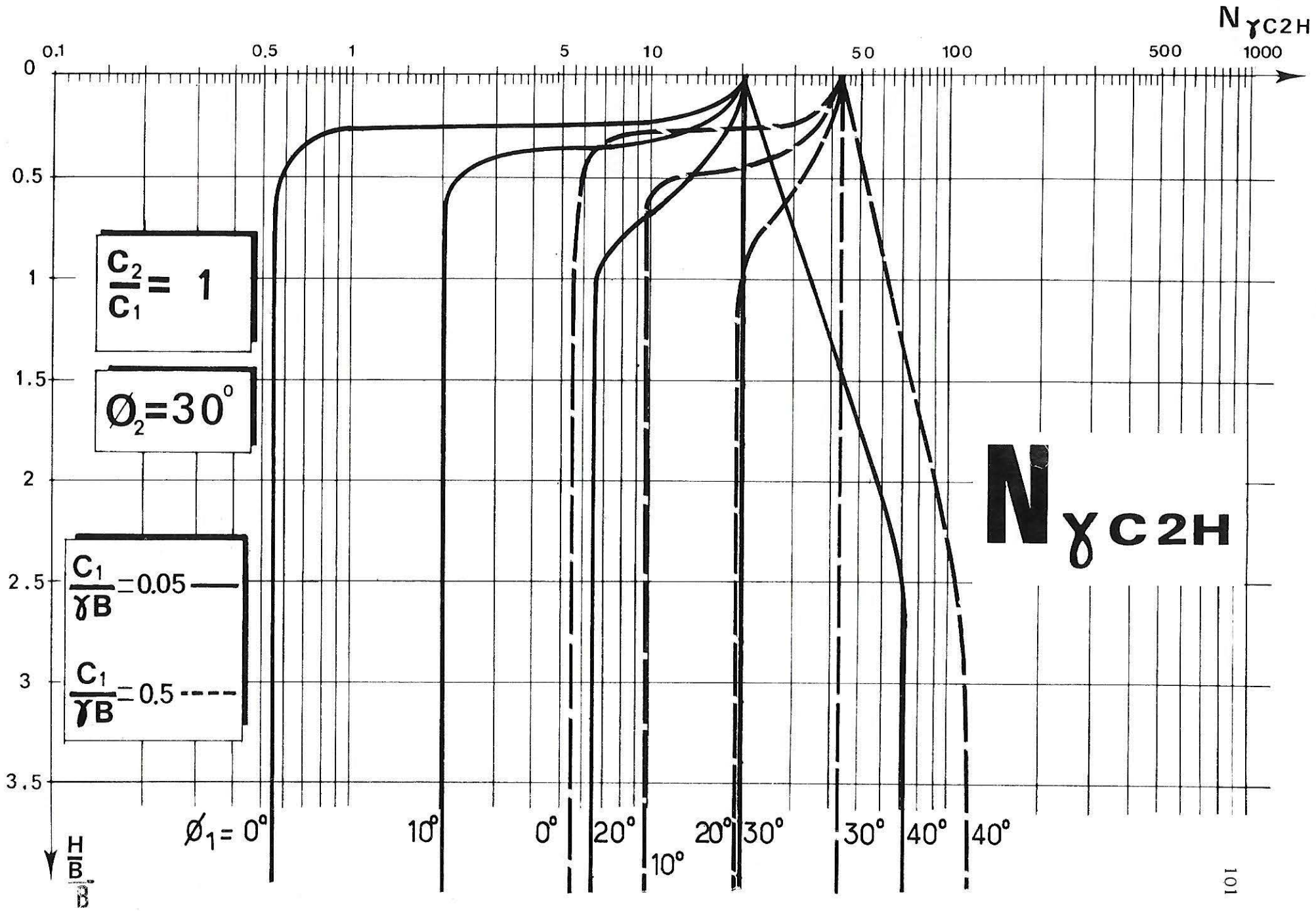
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	20.47	20.47	20.47	20.47	20.47	0.05
	43.49	43.49	43.49	43.49	43.49	0.5
	265.07	265.07	265.07	265.07	265.07	5
	2465.57	2465.57	2465.57	2465.57	2465.57	50
0.1	16.91	18.01	19.21	20.40	21.63	0.05
	38.58	40.17	41.78	43.49	45.25	0.5
	245.02	251.51	258.13	265.07	271.33	5
	2296.86	2354.13	2412.03	2465.57	2521.33	50
0.2	13.33	15.72	17.98	20.40	22.80	0.05
	33.46	36.97	40.15	43.49	46.90	0.5
	223.84	238.23	251.43	265.07	277.89	5
	2118.59	2240.52	2353.38	2465.57	2580.12	50
0.3	0.77	13.18	16.81	20.40	24.06	0.05
	7.71	33.31	38.46	43.49	48.68	0.5
	77.19	223.42	244.67	265.07	284.83	5
	771.95	2114.67	2294.53	2465.57	2634.72	50
0.4	0.61	2.71	15.55	20.40	25.45	0.05
	6.19	16.14	36.63	43.55	50.44	0.5
	61.95	145.38	237.64	265.07	291.73	5
	619.50	1443.54	2235.80	2465.57	2691.40	50
0.5	0.57	2.20	14.03	20.47	26.84	0.05
	5.72	12.09	34.69	43.49	52.40	0.5
	57.21	111.17	229.55	265.07	298.49	5
	572.19	1101.99	2171.05	2465.57	2747.31	50
1	0.55	2.02	6.42	20.47	34.64	0.05
	5.55	9.82	19.74	43.49	62.64	0.5
	55.57	86.09	155.62	265.07	334.39	5
	555.72	848.97	1508.62	2465.57	3038.79	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	44.32	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	75.00	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	373.59	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3348.16	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	56.57	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	89.91	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	416.97	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3674.80	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	107.52	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	464.69	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4030.24	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	518.28	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4409.32	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4800.45	50
$\frac{H}{B} \geq 4$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 1$

$\phi_2 = 30^\circ$



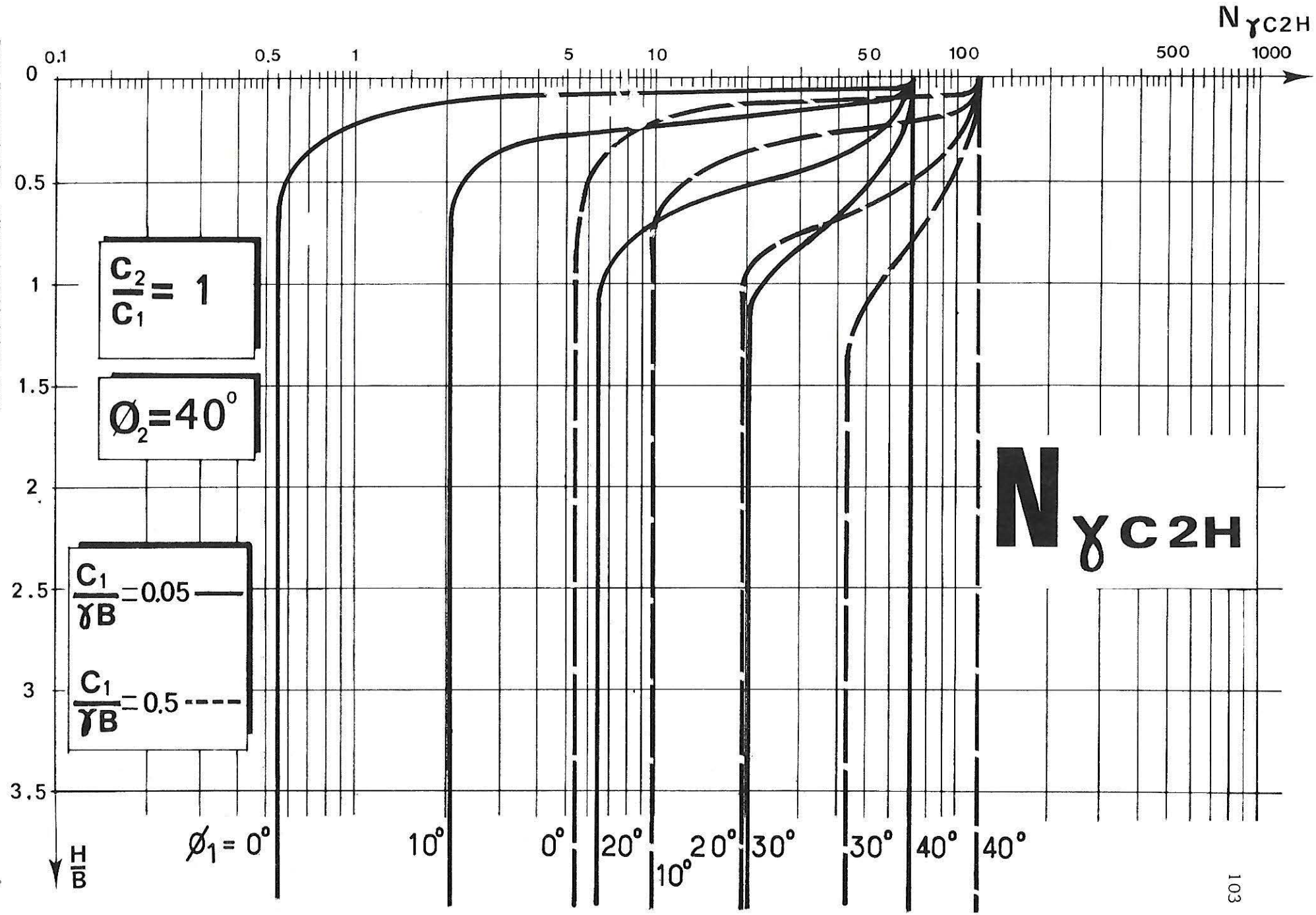
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	71.79	71.79	71.79	71.79	71.79	0.05
	118.47	118.47	118.47	118.47	118.47	0.5
	560.56	560.56	560.56	560.56	560.56	5
	4933.70	4933.70	4933.70	4933.70	4933.70	50
0.1	2.31	62.60	65.76	68.67	71.79	0.05
	23.15	106.56	110.48	114.36	118.47	0.5
	231.53	523.84	536.52	548.30	560.56	5
	2315.36	4649.17	4746.13	4840.59	4933.70	50
0.2	1.19	22.62	59.52	65.73	71.79	0.05
	11.93	94.96	102.46	110.44	118.47	0.5
	119.37	486.91	511.42	536.44	560.56	5
	1193.70	4359.75	4554.63	4745.52	4933.70	50
0.3	0.77	3.85	53.35	62.48	71.79	0.05
	7.78	25.26	94.79	106.42	118.47	0.5
	77.85	447.31	486.45	523.57	560.56	5
	778.54	4053.99	4357.49	4647.25	4933.70	50
0.4	0.61	2.71	47.03	59.29	71.79	0.05
	6.19	16.14	86.65	102.26	118.47	0.5
	61.95	150.42	459.65	511.01	560.56	5
	619.50	1493.25	4155.09	4551.75	4933.70	50
0.5	0.57	2.20	26.23	55.94	71.79	0.05
	5.72	12.09	78.32	98.29	118.47	0.5
	57.21	111.17	432.14	498.26	560.56	5
	572.19	1101.99	3936.89	4450.53	4933.70	50
1	0.55	2.02	6.42	23.87	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.74	57.14	118.47	0.5
	55.57	86.09	155.62	423.40	560.56	5
	555.72	848.97	1508.62	3868.61	4933.70	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	4933.70	50
$\frac{H}{B} \geq 2$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 1$

$\phi_2 = 40^\circ$



$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	0.05
	11.11	11.11	11.11	11.11	11.11	0.5
	111.14	111.14	111.14	111.14	111.14	5
	1111.44	1111.44	1111.44	1111.44	1111.44	50
0.1	1.05	1.16	1.26	1.37	1.48	0.05
	10.59	11.02	11.46	11.89	12.33	0.5
	105.93	109.71	113.45	117.15	120.91	5
	1059.31	1096.55	1133.44	1169.84	1206.77	50
0.2	1.00	1.21	1.44	1.68	1.92	0.05
	10.01	10.97	11.87	12.77	13.71	0.5
	100.12	108.52	116.22	123.89	131.70	5
	1001.26	1084.06	1159.79	1235.11	1311.61	50
0.3	0.77	1.28	1.64	2.02	2.42	0.05
	7.78	10.90	12.32	13.65	14.95	0.5
	77.85	107.12	119.14	130.17	140.55	5
	778.54	1069.32	1187.45	1295.47	1396.67	50
0.4	0.61	1.36	1.87	2.40	2.98	0.05
	6.19	10.81	12.79	14.55	16.33	0.5
	61.95	105.39	122.09	136.27	150.21	5
	619.50	1051.16	1215.15	1353.62	1489.30	50
0.5	0.57	1.45	2.11	2.82	3.61	0.05
	5.72	10.70	13.22	15.52	17.74	0.5
	57.21	103.01	125.35	142.84	159.59	5
	572.19	1026.01	1245.75	1416.32	1578.51	50
1	0.55	2.02	3.67	5.50	7.60	0.05
	5.55	9.82	15.97	20.79	25.62	0.5
	55.57	86.09	136.95	173.84	206.65	5
	555.72	848.97	1358.28	1702.99	2018.60	50
1.5	0.55	2.02	5.82	9.17	13.11	0.05
	5.55	9.82	19.22	27.21	35.02	0.5
	55.57	86.09	143.92	205.37	254.65	5
	555.72	848.97	1387.54	1987.44	2449.54	50
2	0.55	2.02	6.42	13.89	20.24	0.05
	5.55	9.82	19.22	34.73	46.01	0.5
	55.57	86.09	143.92	238.96	303.59	5
	555.72	848.97	1387.54	2273.11	2880.08	50
2.5	0.55	2.02	6.42	19.70	28.98	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	58.75	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	354.65	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3311.03	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	39.36	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	73.19	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	407.50	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3749.78	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	51.38	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	89.32	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	462.99	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4192.47	50
$\frac{H}{B} = \left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

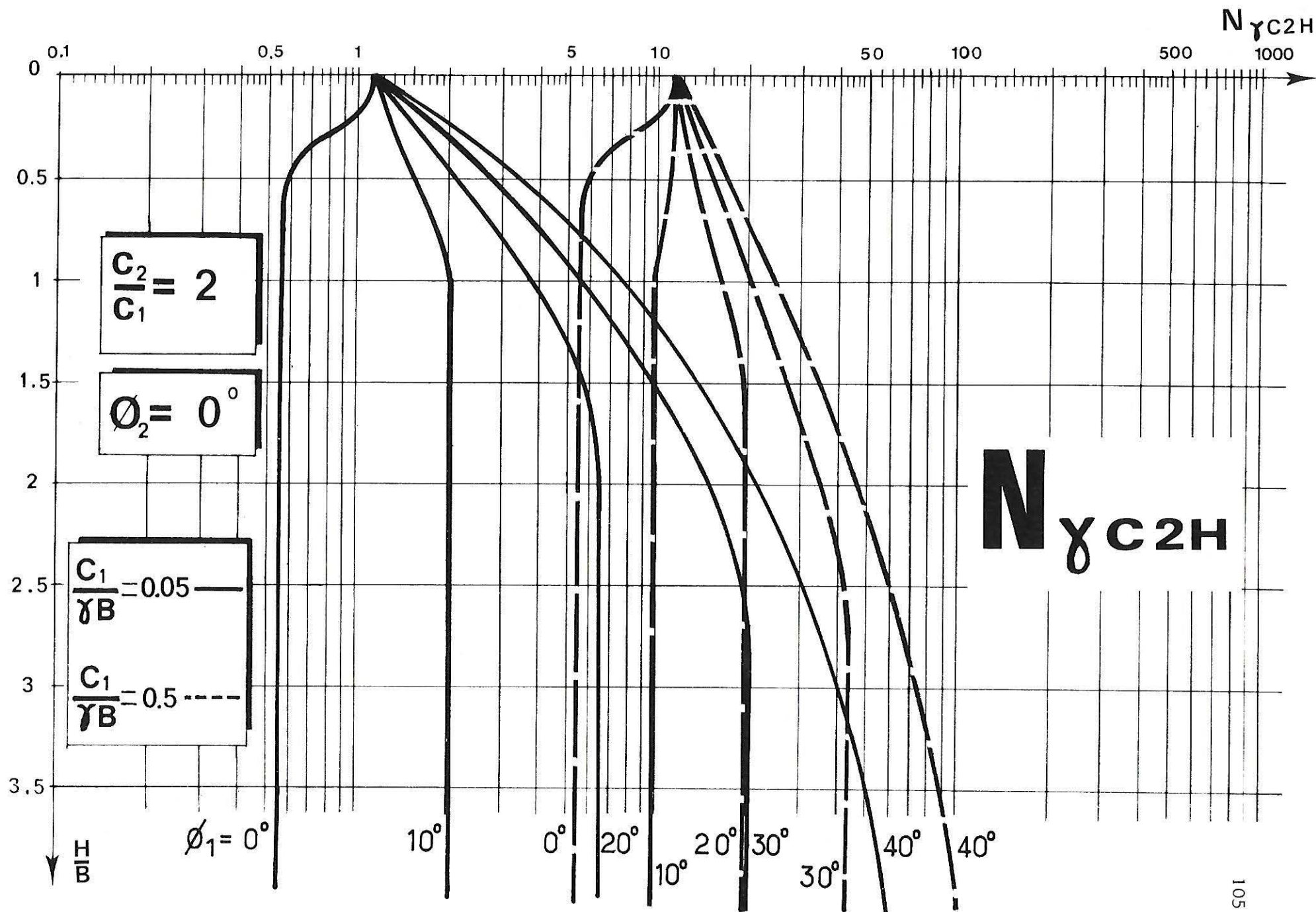
$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 2$

$\phi_2 = 0^\circ$

7-5

$\left(\frac{H}{B}\right)_{lim}$	1	1	2	3	4	0.05
	1	1	1.5	2.5	4.5	0.5
	1	1	1.5	2.5	4.5	5
	1	1	1.5	2.5	4.5	50



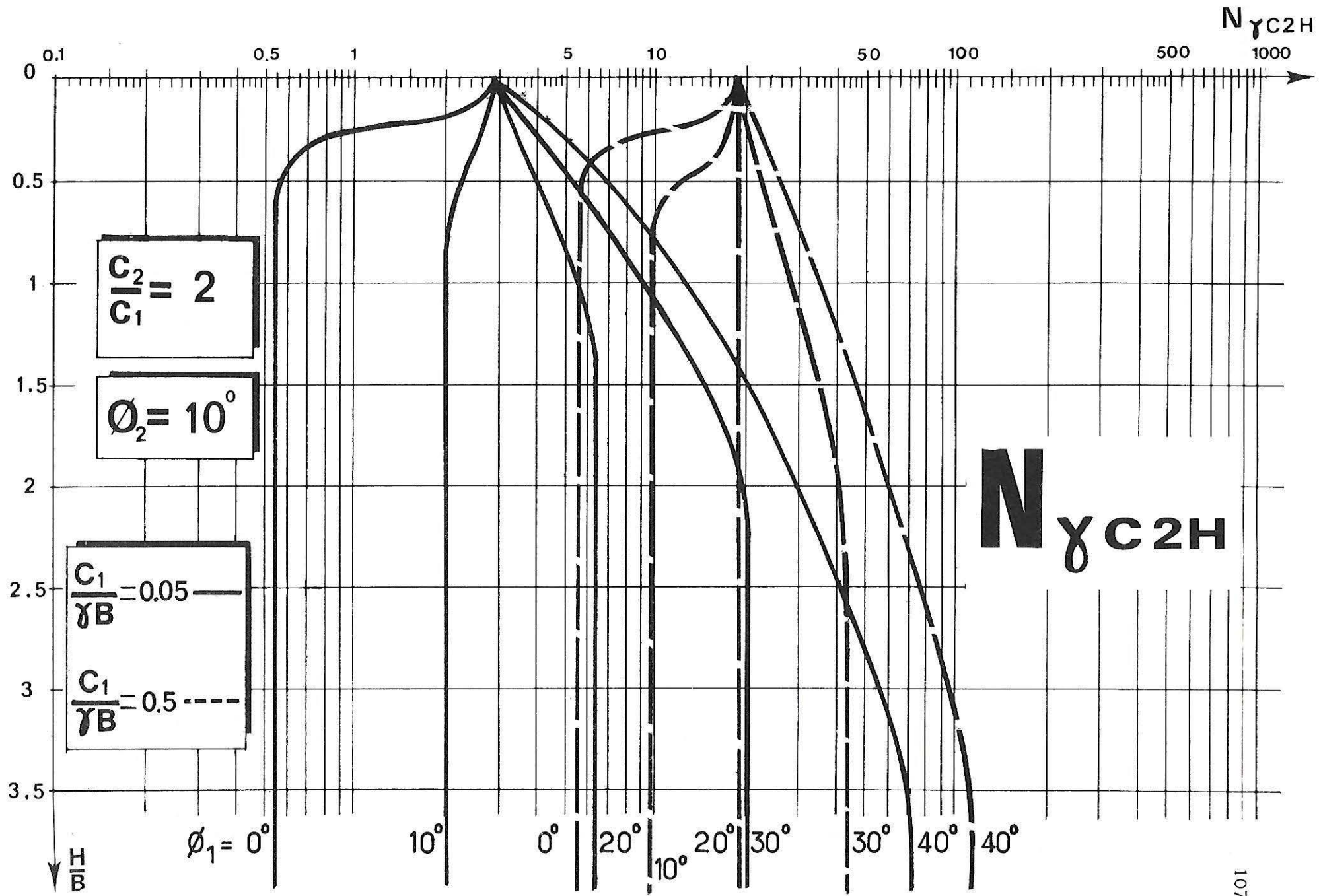
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	0.05
	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	0.5
	170.86	170.86	170.86	170.86	170.86	5
	1696.61	1696.61	1696.61	1696.61	1696.61	50
0.1	2.59	2.84	3.09	3.34	3.60	0.05
	17.00	17.72	18.38	19.07	19.75	0.5
	160.19	165.31	170.53	175.70	181.12	5
	1591.31	1641.15	1691.69	1742.14	1794.31	50
0.2	1.19	2.76	3.28	3.79	4.31	0.05
	15.51	17.10	18.48	19.90	21.32	0.5
	147.35	159.47	170.03	180.85	190.86	5
	1465.81	1583.39	1685.44	1793.37	1886.10	50
0.3	0.77	2.66	3.48	4.27	5.13	0.05
	7.78	16.36	18.59	20.79	22.84	0.5
	77.85	152.86	169.42	185.60	200.53	5
	778.54	1517.90	1677.98	1834.11	1977.80	50
0.4	0.61	2.53	3.69	4.84	5.97	0.05
	6.19	15.47	18.68	21.63	24.53	0.5
	61.95	144.41	168.68	189.91	210.14	5
	619.50	1433.95	1668.93	1873.09	2066.77	50
0.5	0.57	2.20	3.92	5.39	6.94	0.05
	5.72	12.09	18.77	22.51	26.18	0.5
	57.21	111.17	168.70	194.72	219.51	5
	572.19	1101.99	1666.80	1917.28	2153.63	50
1	0.55	2.02	5.53	8.90	12.66	0.05
	5.55	9.82	19.20	27.74	35.58	0.5
	55.57	86.09	155.62	217.83	267.28	5
	555.72	848.97	1508.62	2119.51	2586.76	50
1.5	0.55	2.02	6.42	14.01	20.28	0.05
	5.55	9.82	19.22	34.34	46.90	0.5
	55.57	86.09	143.92	241.79	315.88	5
	555.72	848.97	1387.54	2310.95	3013.11	50
2	0.55	2.02	6.42	19.56	29.82	0.05
	5.55	9.82	19.22	42.50	60.13	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	366.92	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3437.24	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	41.46	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	75.50	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	420.35	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	3872.41	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	55.20	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	93.07	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	475.80	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4305.06	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	71.09	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	112.95	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	534.20	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4746.88	50
$\frac{H}{B} \geq 4$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 2$

$\phi_2 = 10^\circ$

7-5



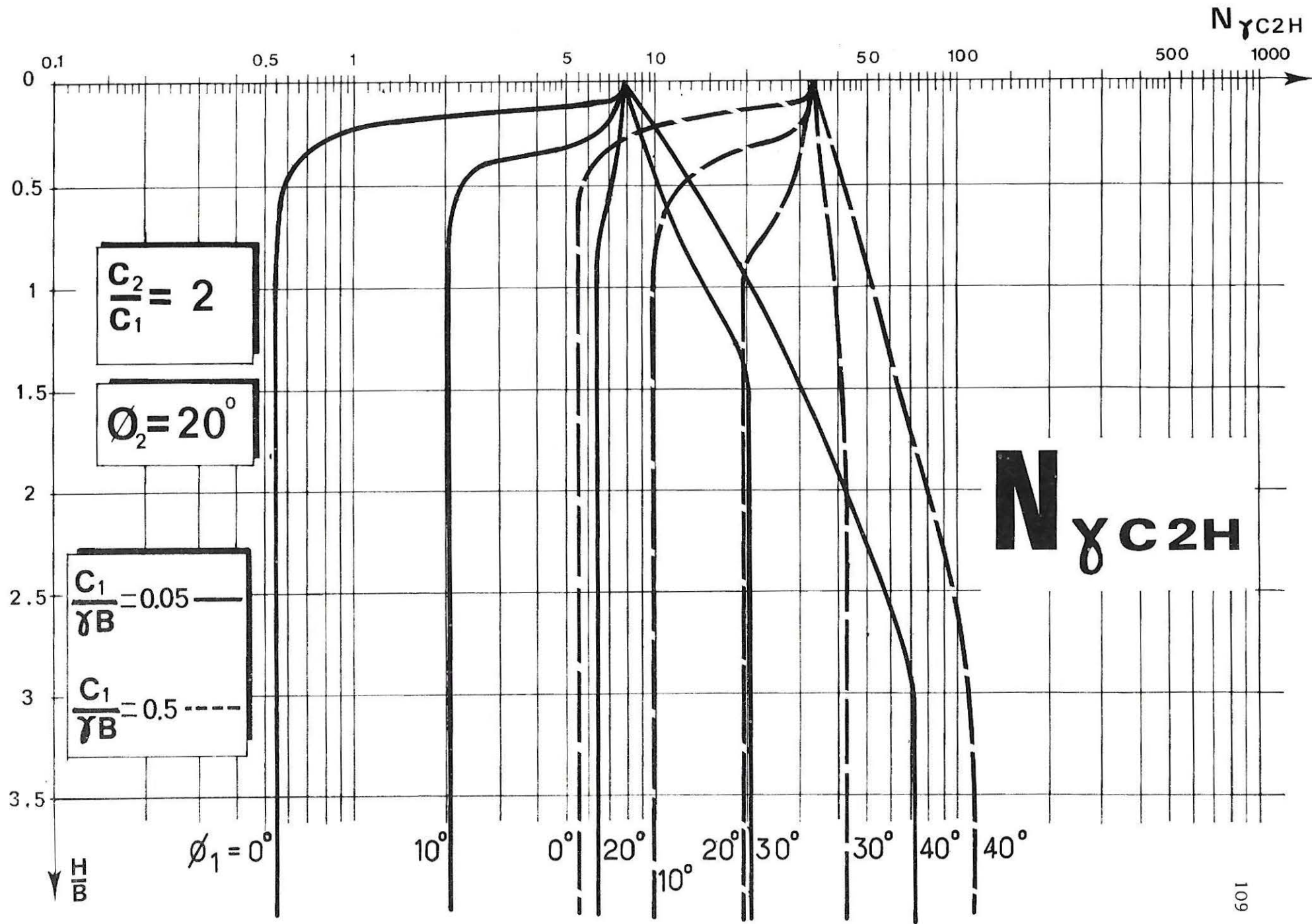
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	7.91	7.91	7.91	7.91	7.91	0.05
	33.18	33.18	33.18	33.18	33.18	0.5
	282.07	282.07	282.07	282.07	282.07	5
	2769.22	2769.22	2769.22	2769.22	2769.22	50
0.1	6.70	7.23	7.81	8.32	8.84	0.05
	30.07	31.22	32.44	33.72	34.85	0.5
	259.65	267.70	275.51	282.86	290.30	5
	2554.09	2632.01	2703.32	2773.32	2844.90	50
0.2	1.19	6.56	7.71	8.77	9.88	0.05
	11.93	29.26	31.65	34.14	36.41	0.5
	119.37	252.12	268.69	283.52	299.30	5
	1193.70	2481.10	2636.17	2777.10	2926.00	50
0.3	0.77	5.81	7.60	9.26	11.04	0.05
	7.78	27.05	30.80	34.55	38.14	0.5
	77.85	235.80	261.58	284.16	307.23	5
	778.54	2320.88	2566.55	2780.53	2997.33	50
0.4	0.61	2.71	7.48	9.76	12.18	0.05
	6.19	15.57	29.91	34.96	39.93	0.5
	61.95	145.38	252.78	284.79	315.24	5
	619.50	1443.54	2480.22	2783.54	3067.72	50
0.5	0.57	2.20	7.30	10.34	13.42	0.05
	5.72	12.09	28.94	35.41	41.73	0.5
	57.21	111.17	243.49	285.40	323.63	5
	572.19	1101.99	2389.34	2786.05	3143.97	50
1	0.55	2.02	6.42	13.73	20.81	0.05
	5.55	9.82	19.74	38.16	51.83	0.5
	55.57	86.09	155.62	284.39	364.38	5
	555.72	848.97	1508.62	2748.44	3493.21	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.40	30.25	0.05
	5.55	9.82	19.22	42.16	64.09	0.5
	55.57	86.09	143.92	268.28	406.72	5
	555.72	848.97	1387.54	2501.40	3834.70	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	41.98	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	79.10	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	451.60	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4182.74	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	55.95	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	95.89	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	499.83	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4532.23	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	115.67	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	552.19	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4903.77	50
$\frac{H}{B} \geq 3.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 2$

$\phi_2 = 20^\circ$



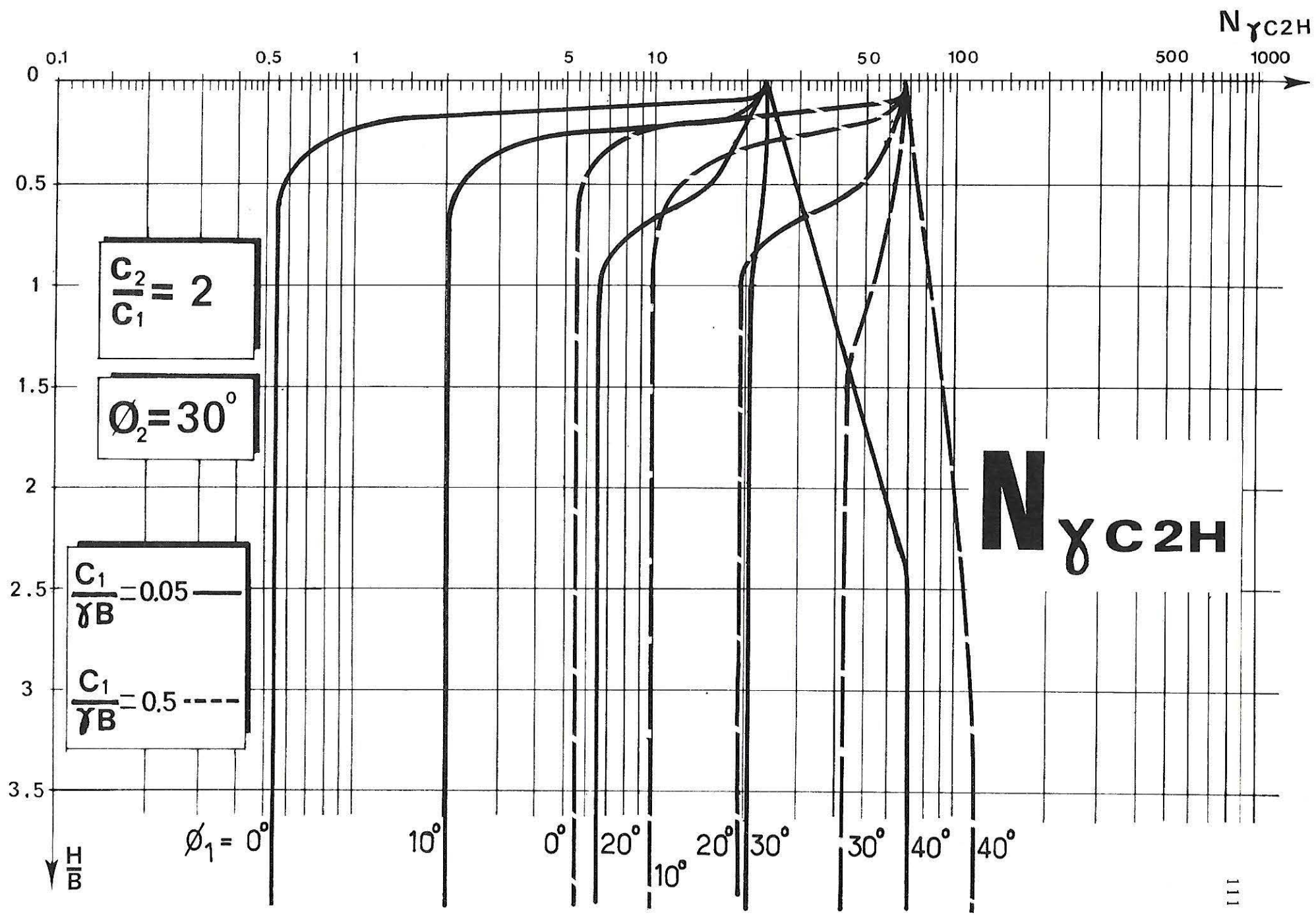
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	23.08	23.08	23.08	23.08	23.08	0.05
	68.42	68.42	68.42	68.42	68.42	0.5
	509.57	509.57	509.57	509.57	509.57	5
	4910.61	4910.61	4910.61	4910.61	4910.61	50
0.1	19.24	20.45	21.69	22.98	24.17	0.05
	60.69	62.93	65.30	67.44	69.68	0.5
	464.64	476.43	488.76	501.18	512.71	5
	4492.13	4603.87	4720.85	4826.86	4935.74	50
0.2	1.19	17.89	20.57	22.85	25.29	0.05
	11.93	57.49	61.84	66.44	70.96	0.5
	119.37	442.76	467.47	492.40	515.95	5
	1193.70	4294.18	4514.47	4741.85	4961.53	50
0.3	0.77	3.85	18.88	22.70	26.51	0.05
	7.78	25.26	58.52	65.42	72.23	0.5
	77.85	406.08	446.34	482.94	519.31	5
	778.54	3941.84	4308.78	4655.30	4988.11	50
0.4	0.61	2.71	17.41	22.56	27.82	0.05
	6.19	16.14	55.08	64.36	73.60	0.5
	61.95	150.42	421.27	473.26	522.81	5
	619.50	1493.25	4082.36	4559.68	5009.79	50
0.5	0.57	2.20	15.66	22.42	29.16	0.05
	5.72	12.09	50.91	63.21	74.95	0.5
	57.21	111.17	396.43	463.31	525.99	5
	572.19	1101.99	3844.59	4460.31	5027.88	50
1	0.55	2.02	6.42	21.46	36.49	0.05
	5.55	9.82	19.74	55.44	82.42	0.5
	55.57	86.09	155.62	397.04	540.13	5
	555.72	848.97	1508.62	3540.39	5117.51	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	46.20	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	91.57	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	551.40	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	5171.63	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	57.92	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	103.25	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.13	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5134.20	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 2$

$\phi_2 = 30^\circ$



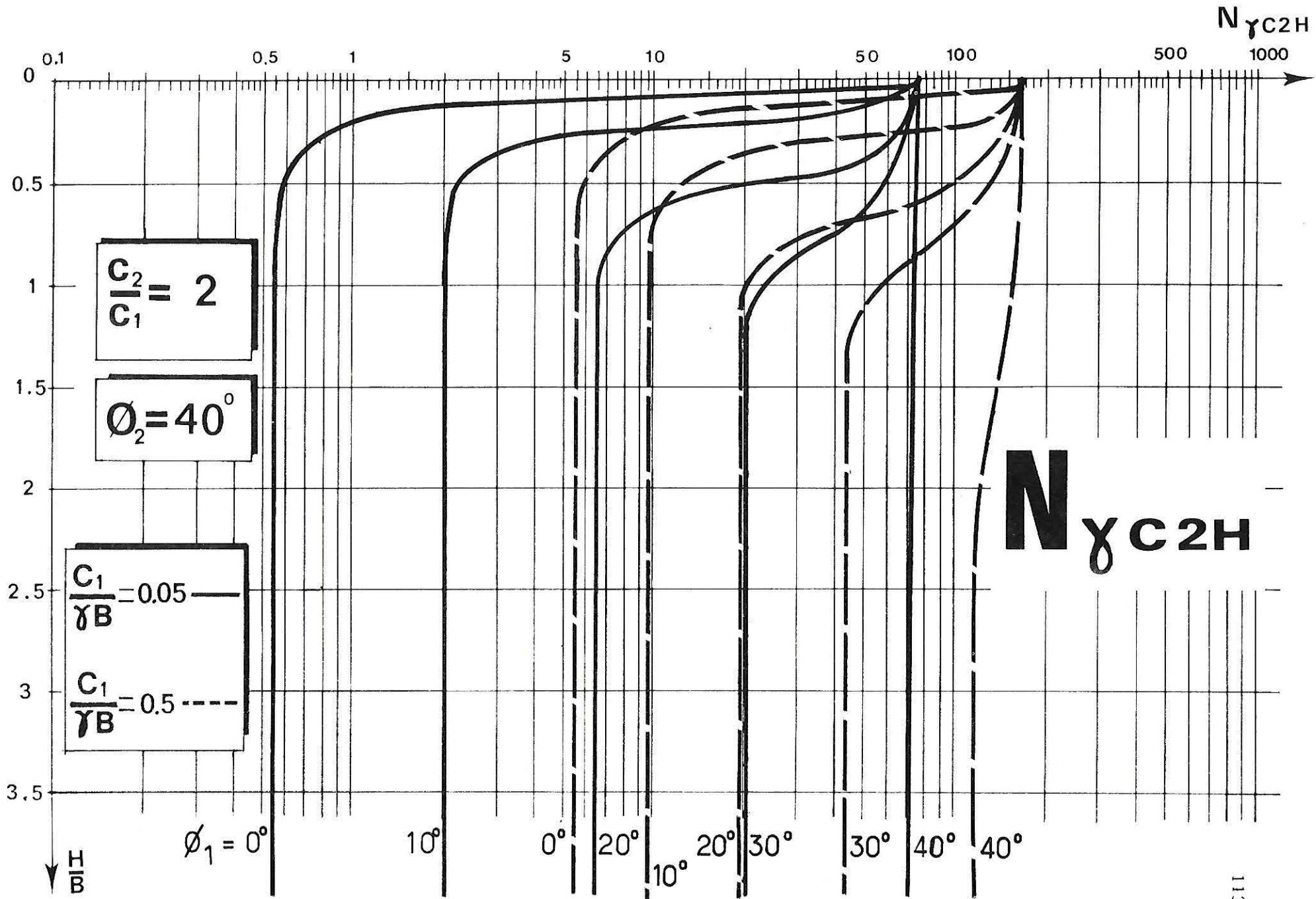
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	77.17	77.17	77.17	77.17	77.17	0.05
	168.82	168.82	168.82	168.82	168.82	0.5
	1047.59	1047.59	1047.59	1047.59	1047.59	5
	9791.52	9791.52	9791.52	9791.52	9791.52	50
0.1	2.31	67.52	70.58	73.67	76.99	0.05
	23.15	152.40	157.44	162.51	167.38	0.5
	231.53	971.60	992.25	1013.66	1035.91	5
	2315.36	9115.59	9305.22	9493.03	9675.13	50
0.2	1.19	22.62	64.06	70.38	76.81	0.05
	11.93	136.22	146.12	155.89	165.93	0.5
	119.37	893.83	936.71	980.13	1023.41	5
	1193.70	8429.31	8813.72	9184.46	9557.80	50
0.3	0.77	3.85	57.87	67.02	76.63	0.05
	7.78	25.26	134.57	149.32	164.46	0.5
	77.85	239.41	880.42	945.92	1010.76	5
	778.54	2380.90	8307.07	8876.57	9439.35	50
0.4	0.61	2.71	50.78	63.52	76.44	0.05
	6.19	16.14	123.08	142.89	162.97	0.5
	61.95	150.42	819.71	911.09	997.98	5
	619.50	1493.25	7757.48	8558.63	9319.60	50
0.5	0.57	2.20	26.23	59.85	76.25	0.05
	5.72	12.09	104.95	135.95	161.46	0.5
	57.21	111.17	756.79	875.06	985.01	5
	572.19	1101.99	7185.14	8236.95	9198.33	50
1	0.55	2.02	6.42	23.87	75.23	0.05
	5.55	9.82	19.74	57.14	152.87	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	915.57	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	8515.54	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	73.89	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	141.60	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	817.88	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	7588.32	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	583.91	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5245.54	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 2$

$\phi_2 = 40^\circ$



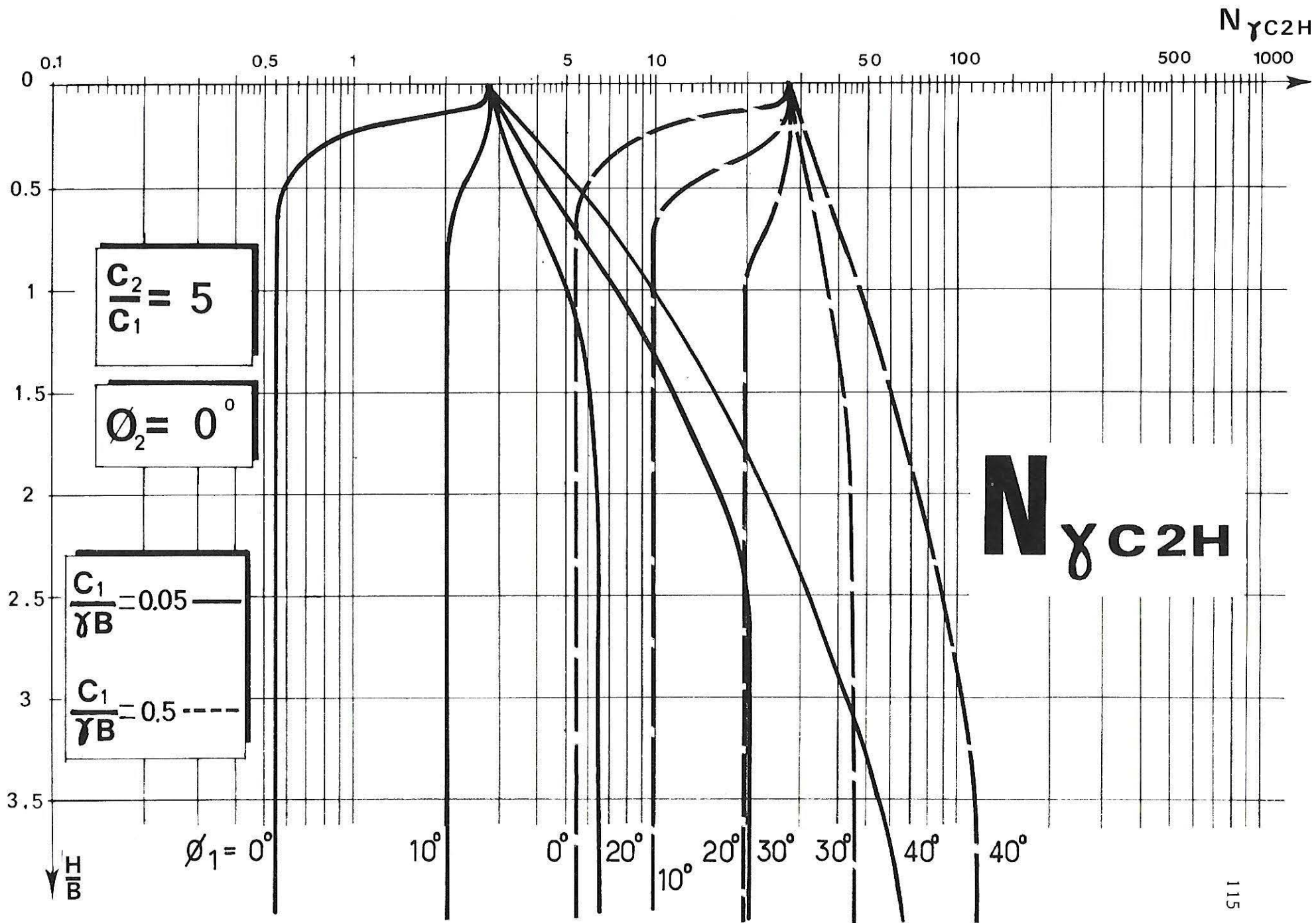
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	0.05
	27.78	27.78	27.78	27.78	27.78	0.5
	277.86	277.86	277.86	277.86	277.86	5
	2778.60	2778.60	2778.60	2778.60	2778.60	50
0.1	2.58	2.74	2.89	3.05	3.21	0.05
	25.80	26.72	27.73	28.73	29.70	0.5
	258.06	266.72	276.15	285.60	294.68	5
	2580.67	2666.65	2760.44	2854.29	2944.41	50
0.2	1.22	2.68	3.03	3.38	3.73	0.05
	12.28	25.62	27.75	29.80	31.86	0.5
	122.89	255.04	275.07	294.12	313.20	5
	1228.93	2549.27	2748.23	2937.33	3126.60	50
0.3	0.85	2.63	3.19	3.76	4.29	0.05
	8.55	24.21	27.71	30.93	33.75	0.5
	85.52	240.08	273.03	302.83	328.63	5
	855.21	2398.79	2726.30	3021.91	3277.30	50
0.4	0.65	2.54	3.37	4.13	4.93	0.05
	6.56	15.57	27.58	31.81	35.84	0.5
	65.60	145.38	269.72	308.89	345.48	5
	656.02	1443.54	2691.16	3079.75	3441.72	50
0.5	0.57	2.20	3.58	4.59	5.61	0.05
	5.72	12.09	27.35	32.78	37.74	0.5
	57.21	111.17	264.88	315.12	359.29	5
	572.19	1101.99	2640.26	3138.61	3575.00	50
1	0.55	2.02	5.00	7.39	9.94	0.05
	5.55	9.82	19.74	37.52	48.10	0.5
	55.57	86.09	155.62	332.31	428.69	5
	555.72	848.97	1508.62	3272.49	4232.06	50
1.5	0.55	2.02	6.42	11.22	15.81	0.05
	5.55	9.82	19.22	42.57	59.77	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	489.29	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	4801.80	50
2	0.55	2.02	6.42	16.16	23.30	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	73.12	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	542.94	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	32.45	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	88.33	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	43.23	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	105.59	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	55.67	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
$\frac{H}{B} \geq 4$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 5$

$\phi_2 = 0^\circ$

7-5



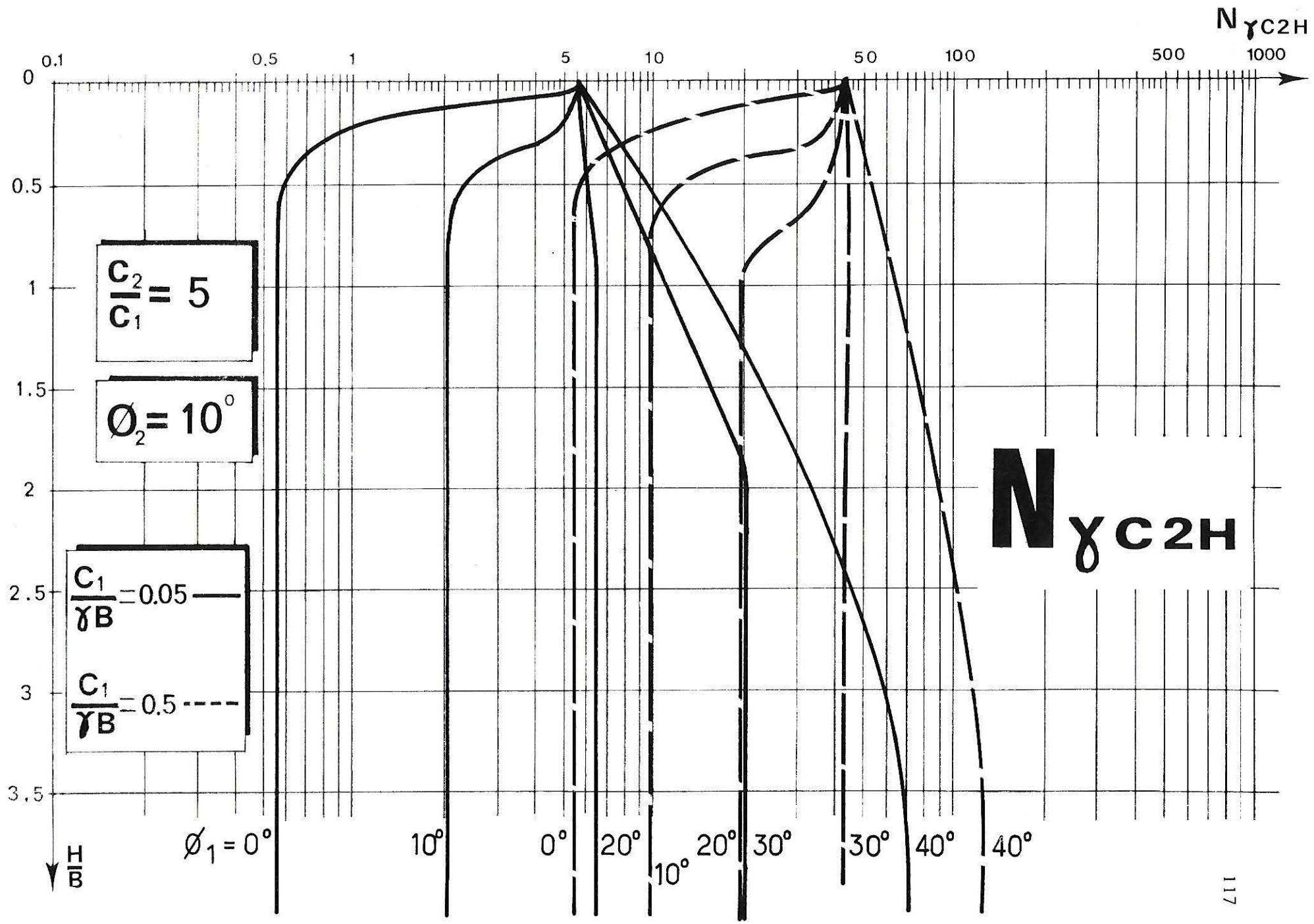
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52	0.05
	43.72	43.72	43.72	43.72	43.72	0.5
	425.15	425.15	425.15	425.15	425.15	5
	4239.53	4239.53	4239.53	4239.53	4239.53	50
0.1	2.31	5.25	5.58	5.92	6.21	0.05
	23.15	41.48	42.88	44.32	45.77	0.5
	231.53	402.96	415.85	428.33	441.50	5
	2315.36	4017.71	4144.96	4268.49	4398.84	50
0.2	1.19	4.95	5.64	6.29	6.96	0.05
	11.93	38.93	41.94	44.92	47.90	0.5
	119.37	378.59	405.18	431.53	457.07	5
	1193.70	3775.25	4037.61	4297.75	4548.96	50
0.3	0.77	4.58	5.71	6.72	7.80	0.05
	7.78	35.79	40.88	45.56	49.81	0.5
	77.85	347.70	393.04	434.25	470.54	5
	778.54	3466.82	3914.40	4320.65	4678.04	50
0.4	0.61	2.71	5.74	7.24	8.66	0.05
	6.19	16.14	39.58	46.00	51.93	0.5
	61.95	150.42	378.36	434.46	485.35	5
	619.50	1493.25	3766.34	4319.29	4819.86	50
0.5	0.57	2.20	5.81	7.73	9.66	0.05
	5.72	12.09	37.98	46.41	53.88	0.5
	57.21	111.17	360.03	434.24	497.62	5
	572.19	1101.99	3580.68	4312.86	4935.55	50
1	0.55	2.02	6.42	11.00	15.59	0.05
	5.55	9.82	19.74	47.48	64.38	0.5
	55.57	86.09	155.62	371.00	555.50	5
	555.72	848.97	1508.62	3540.39	5468.22	50
1.5	0.55	2.02	6.42	15.59	23.32	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	76.15	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	599.18	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	5806.15	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	33.04	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	89.94	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	583.91	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5245.54	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	44.91	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	106.34	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	58.95	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
$\frac{H}{B} \geq 3.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 5$

$\phi_2 = 10^\circ$

5



7-5

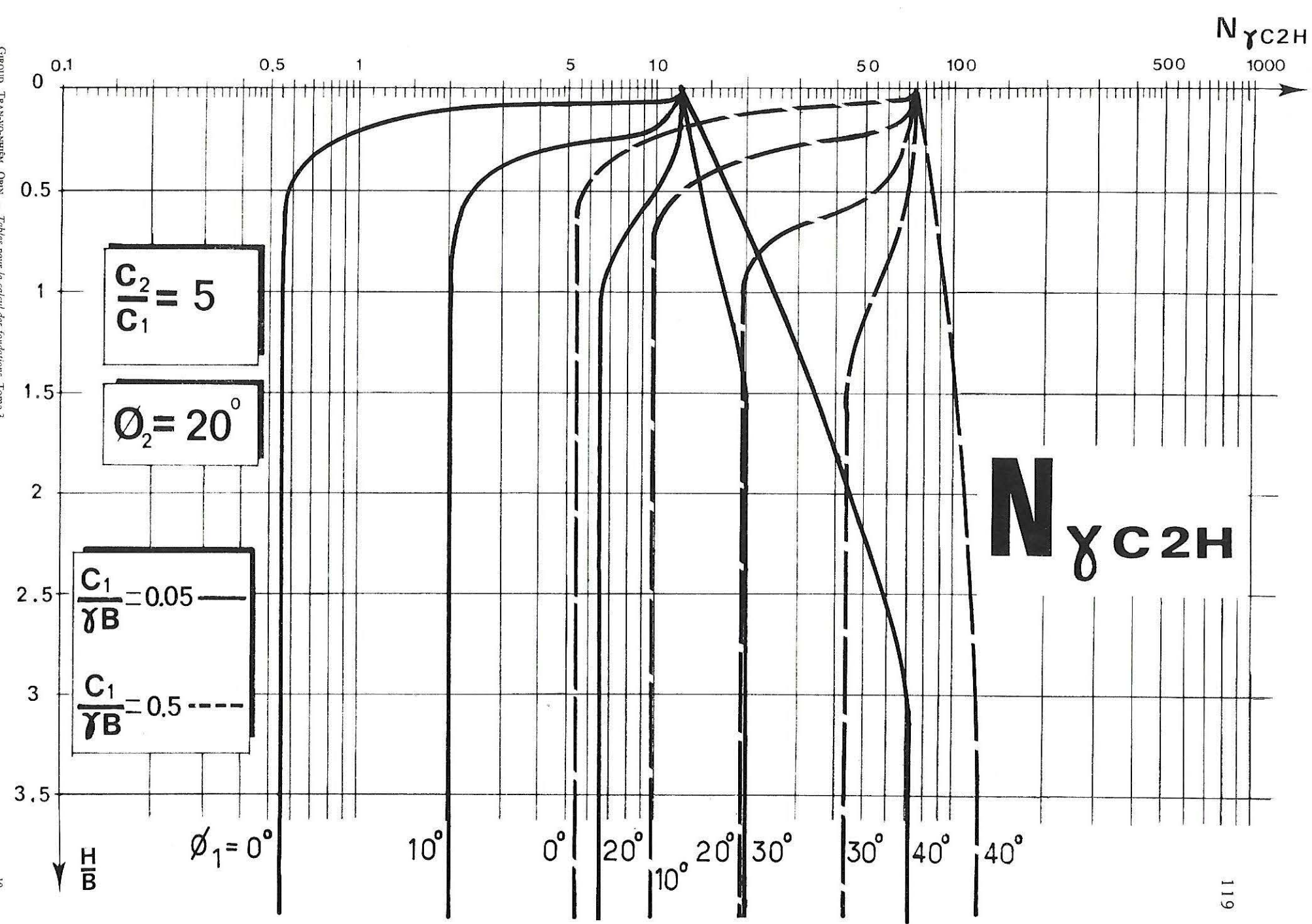
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	0.05
	74.87	74.87	74.87	74.87	74.87	0.5
	696.70	696.70	696.70	696.70	696.70	5
	6914.28	6914.28	6914.28	6914.28	6914.28	50
0.1	2.31	11.25	11.86	12.50	13.12	0.05
	23.15	69.63	72.15	74.26	76.39	0.5
	231.53	653.36	670.32	688.05	705.92	5
	2315.36	6466.34	6651.52	6825.32	7001.26	50
0.2	1.19	10.15	11.50	12.79	14.15	0.05
	11.93	64.16	68.94	73.59	78.03	0.5
	119.37	601.30	643.13	678.59	715.90	5
	1193.70	5973.00	6382.07	6727.96	7095.09	50
0.3	0.77	3.85	11.11	13.11	15.22	0.05
	7.78	25.26	65.62	72.85	79.81	0.5
	77.85	239.41	610.40	667.95	724.38	5
	778.54	2380.90	6057.15	6620.61	7169.11	50
0.4	0.61	2.71	10.68	13.58	16.30	0.05
	6.19	16.14	62.06	72.01	81.41	0.5
	61.95	150.42	574.92	656.23	731.56	5
	619.50	1493.25	5703.80	6498.98	7233.90	50
0.5	0.57	2.20	10.11	13.86	17.51	0.05
	5.72	12.09	57.76	71.05	82.99	0.5
	57.21	111.17	534.02	642.97	738.48	5
	572.19	1101.99	5296.34	6362.83	7292.99	50
1	0.55	2.02	6.42	16.24	24.65	0.05
	5.55	9.82	19.74	54.18	91.15	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	760.79	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	7459.12	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	34.06	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	100.05	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	749.65	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	7227.69	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	45.55	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	110.42	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	583.91	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5245.54	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	59.42	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
$\frac{H}{B} \approx 3$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 5$

$\phi_2 = 20^\circ$

Горизонтальная ось — угол наклона основания α



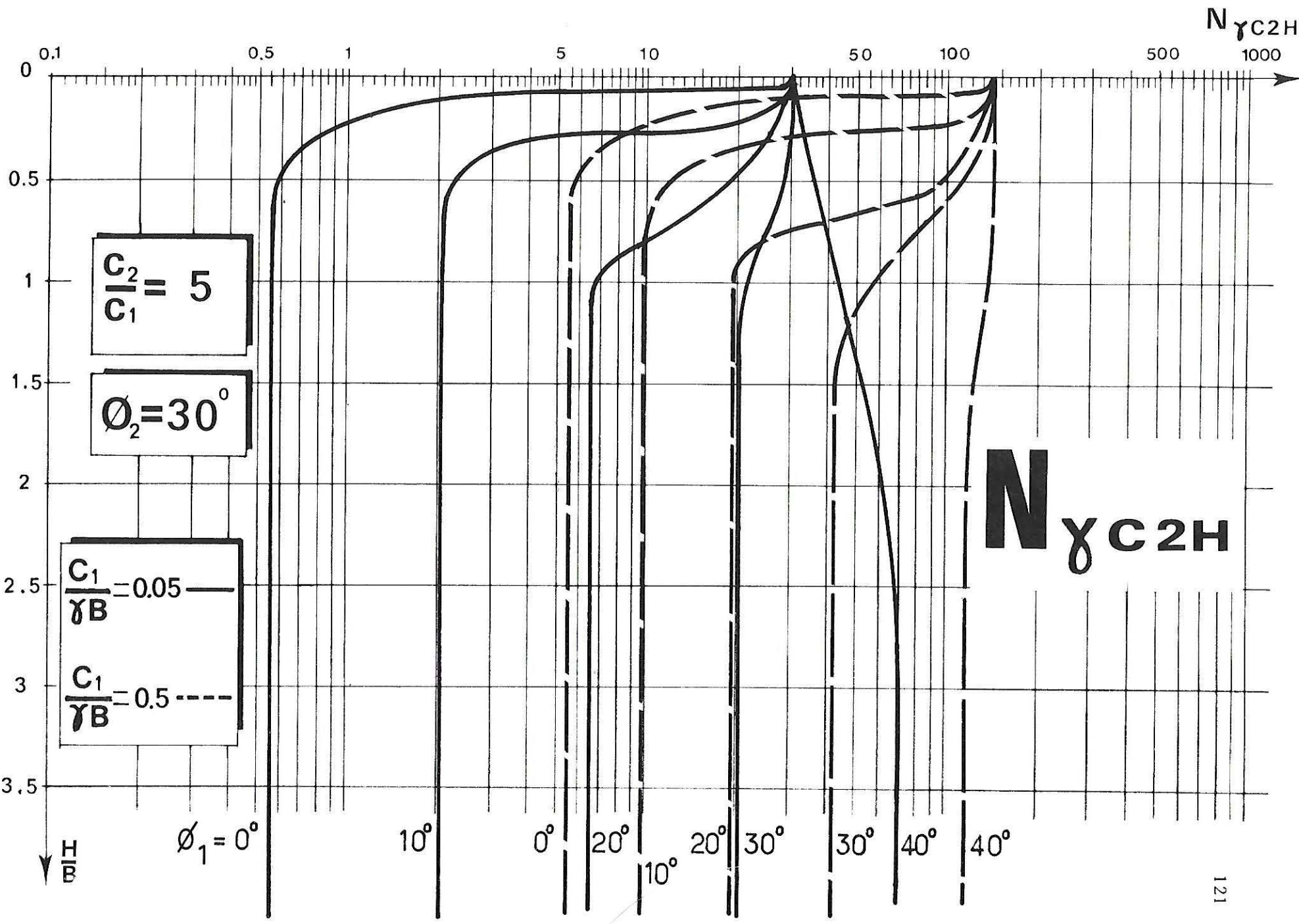
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	30.82	30.82	30.82	30.82	30.82	0.05
	142.24	142.24	142.24	142.24	142.24	0.5
	1243.06	1243.06	1243.06	1243.06	1243.06	5
	12245.74	12245.74	12245.74	12245.74	12245.74	50
0.1	2.31	27.69	29.03	30.38	31.74	0.05
	23.15	131.19	134.78	138.58	142.11	0.5
	231.53	1151.34	1180.77	1209.54	1237.00	5
	2315.36	11353.20	11641.25	11910.83	12179.08	50
0.2	1.19	22.62	27.19	29.92	32.73	0.05
	11.93	118.78	127.07	134.85	141.99	0.5
	119.37	1056.19	1115.79	1174.55	1230.35	5
	1193.70	10431.17	10998.03	11570.96	12106.06	50
0.3	0.77	3.85	25.06	29.41	33.82	0.05
	7.78	25.26	118.57	130.84	141.87	0.5
	77.85	239.41	1048.08	1136.77	1223.02	5
	778.54	2380.90	10338.14	11195.28	12025.83	50
0.4	0.61	2.71	23.01	28.89	35.00	0.05
	6.19	16.14	110.09	126.66	141.76	0.5
	61.95	150.42	972.37	1098.11	1214.91	5
	619.50	1493.25	9593.93	10808.89	11937.39	50
0.5	0.57	2.20	20.58	28.39	35.92	0.05
	5.72	12.09	99.76	122.34	141.64	0.5
	57.21	111.17	892.37	1056.29	1205.91	5
	572.19	1101.99	8766.66	10397.11	11839.49	50
1	0.55	2.02	6.42	22.66	42.26	0.05
	5.55	9.82	19.74	57.14	141.53	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	1140.78	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	11132.54	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	50.85	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	137.04	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	960.59	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	8841.47	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	61.55	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	598.61	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5379.98	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 5$

$\phi_2 = 30^\circ$



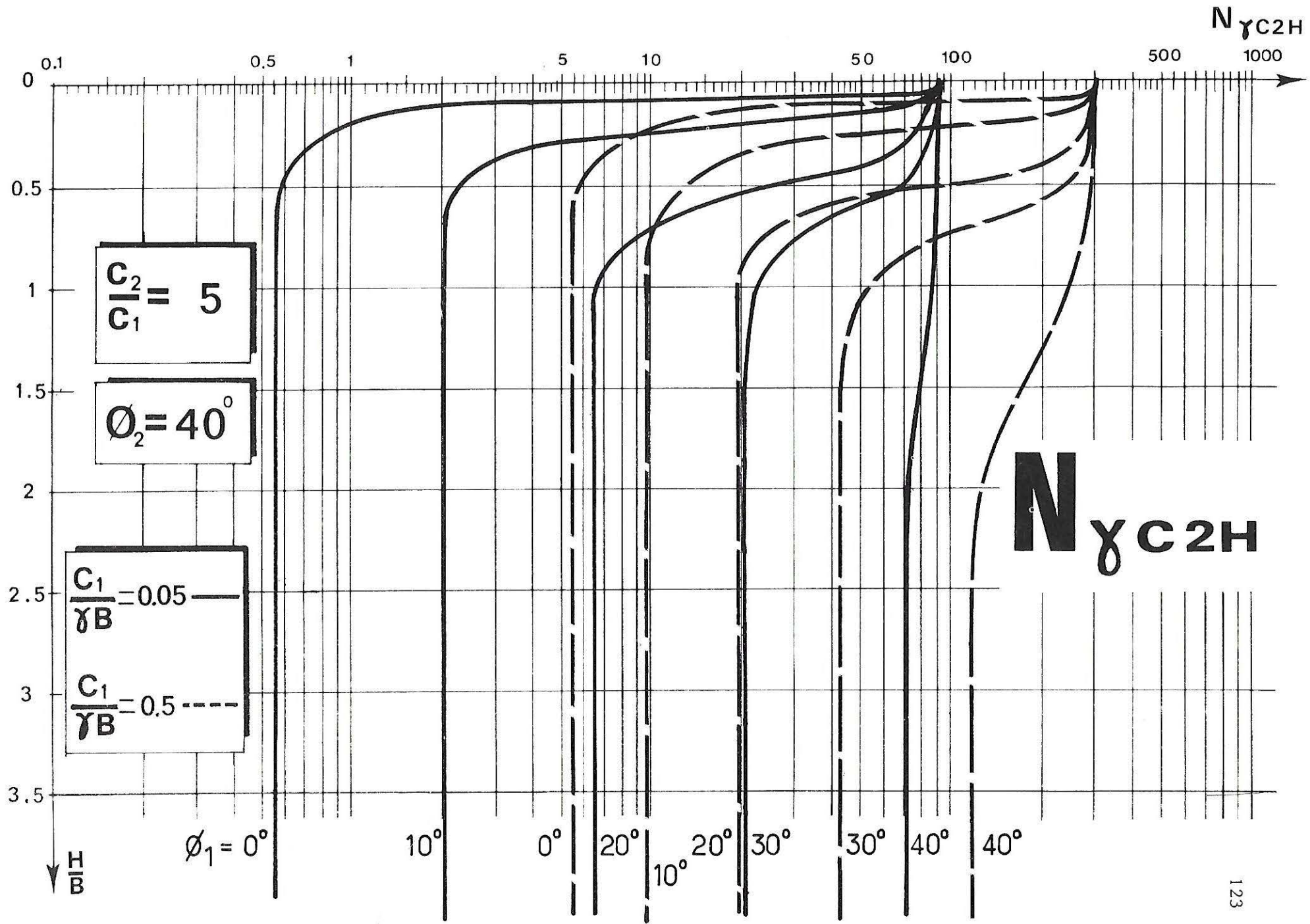
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	92.81	92.81	92.81	92.81	92.81	0.05
	316.83	316.83	316.83	316.83	316.83	0.5
	2504.82	2504.82	2504.82	2504.82	2504.82	5
	24365.03	24365.03	24365.03	24365.03	24365.03	50
0.1	2.31	81.69	85.09	88.72	92.17	0.05
	23.15	288.51	296.14	303.72	311.64	0.5
	231.53	2311.46	2359.87	2410.16	2458.22	5
	2315.36	22515.05	22982.66	23450.56	23899.62	50
0.2	1.19	22.62	77.72	84.38	91.53	0.05
	11.93	163.36	275.18	290.87	306.22	0.5
	119.37	1570.87	2213.00	2311.71	2411.25	5
	1193.70	15645.97	21577.90	22501.71	23430.55	50
0.3	0.77	3.85	69.91	80.28	90.89	0.05
	7.78	25.26	253.76	277.54	300.75	0.5
	77.85	239.41	2062.74	2213.50	2362.00	5
	778.54	2380.90	20132.83	21565.28	22957.10	50
0.4	0.61	2.71	62.07	76.07	90.23	0.05
	6.19	16.14	231.60	263.29	295.22	0.5
	61.95	150.42	1899.10	2111.95	2310.94	5
	619.50	1493.25	18565.72	20568.90	22460.08	50
0.5	0.57	2.20	26.23	71.62	89.56	0.05
	5.72	12.09	104.95	249.42	289.60	0.5
	57.21	111.17	892.37	2004.03	2259.20	5
	572.19	1101.99	8766.66	19549.35	21943.18	50
1	0.55	2.02	6.42	23.87	85.56	0.05
	5.55	9.82	19.74	57.14	256.65	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	1964.32	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	19039.44	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	80.14	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	172.84	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	960.59	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	8841.47	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	121.24	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	598.61	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5379.98	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 5$

$\phi_2 = 40^\circ$



7-5

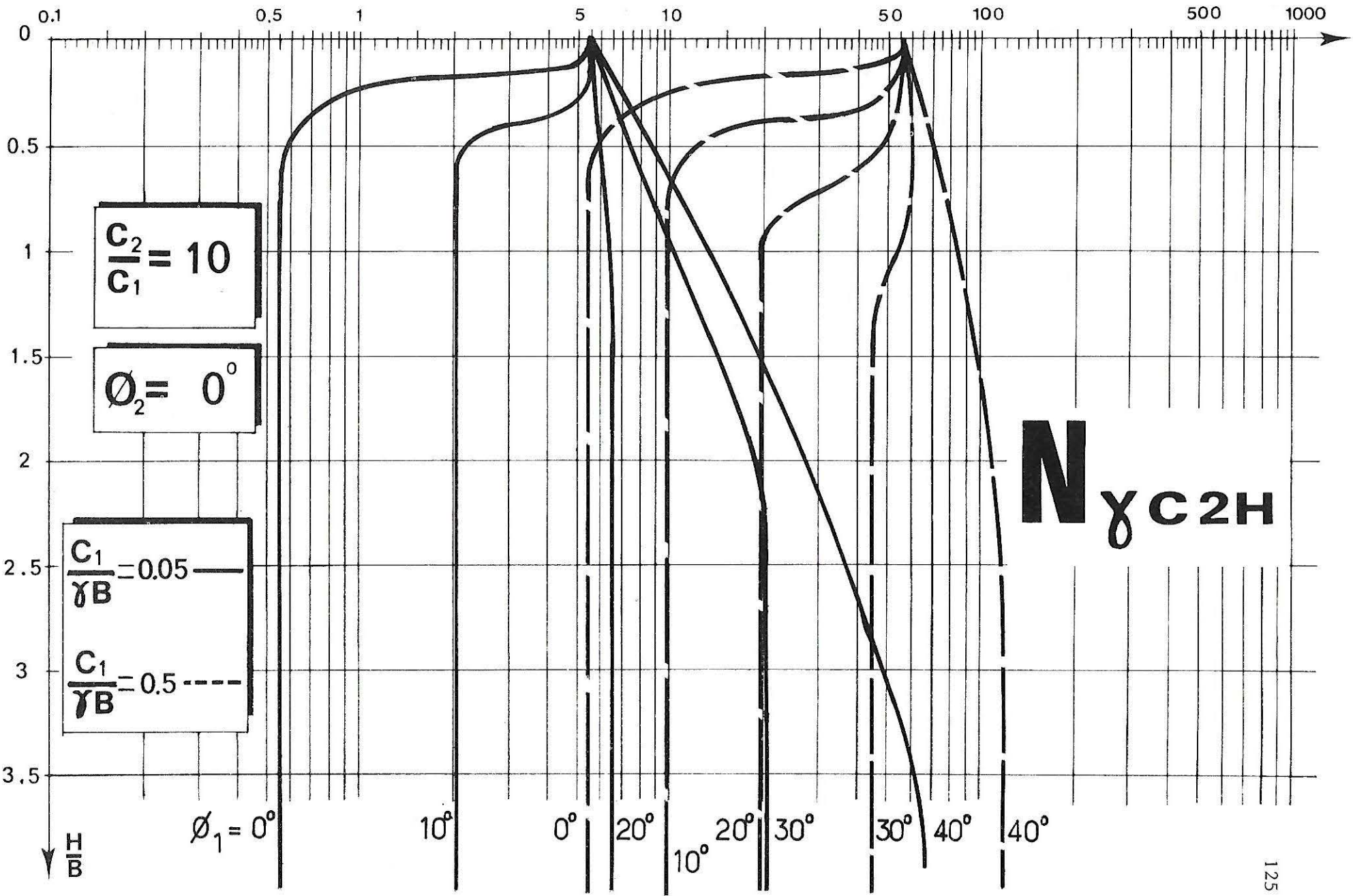
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55	0.05
	55.57	55.57	55.57	55.57	55.57	0.5
	555.72	555.72	555.72	555.72	555.72	5
	5557.20	5557.20	5557.20	5557.20	5557.20	50
0.1	5.11	5.34	5.60	5.85	6.11	0.05
	51.11	52.88	54.84	56.80	58.66	0.5
	511.18	528.28	547.32	566.28	584.28	5
	5111.86	5282.28	5472.11	5661.11	5840.48	50
0.2	1.22	5.14	5.67	6.21	6.76	0.05
	12.28	50.19	54.16	58.14	62.11	0.5
	122.89	500.71	539.14	577.56	615.70	5
	1228.93	5005.90	5388.94	5771.80	6151.60	50
0.3	0.85	4.81	5.74	6.61	7.41	0.05
	8.55	45.90	53.24	59.53	65.00	0.5
	85.52	239.41	528.18	588.86	641.00	5
	855.21	2380.90	5277.68	5882.15	6401.08	50
0.4	0.65	2.71	5.82	7.00	8.16	0.05
	6.56	16.14	51.91	60.42	68.25	0.5
	65.60	150.42	512.64	594.70	669.35	5
	656.02	1493.25	5119.94	5937.58	6680.46	50
0.5	0.57	2.20	5.91	7.44	8.92	0.05
	5.72	12.09	49.82	61.22	70.84	0.5
	57.21	111.17	487.84	598.98	690.46	5
	572.19	1101.99	4867.24	5976.66	6886.70	50
1	0.55	2.02	6.42	10.29	13.76	0.05
	5.55	9.82	19.74	54.18	84.33	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	788.18	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	7827.30	50
1.5	0.55	2.02	6.42	14.33	20.13	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	98.00	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	821.51	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	7767.31	50
2	0.55	2.02	6.42	19.55	28.13	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	111.02	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	598.61	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5379.98	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	37.89	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
3	0.55	2.02	6.42	20.47	49.35	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
3.5	0.55	2.02	6.42	20.47	62.47	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
$\frac{H}{B} = 4$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 10$

$\phi_2 = 0^\circ$

$N_{\gamma C2H}$



$N_{\gamma C2H}$

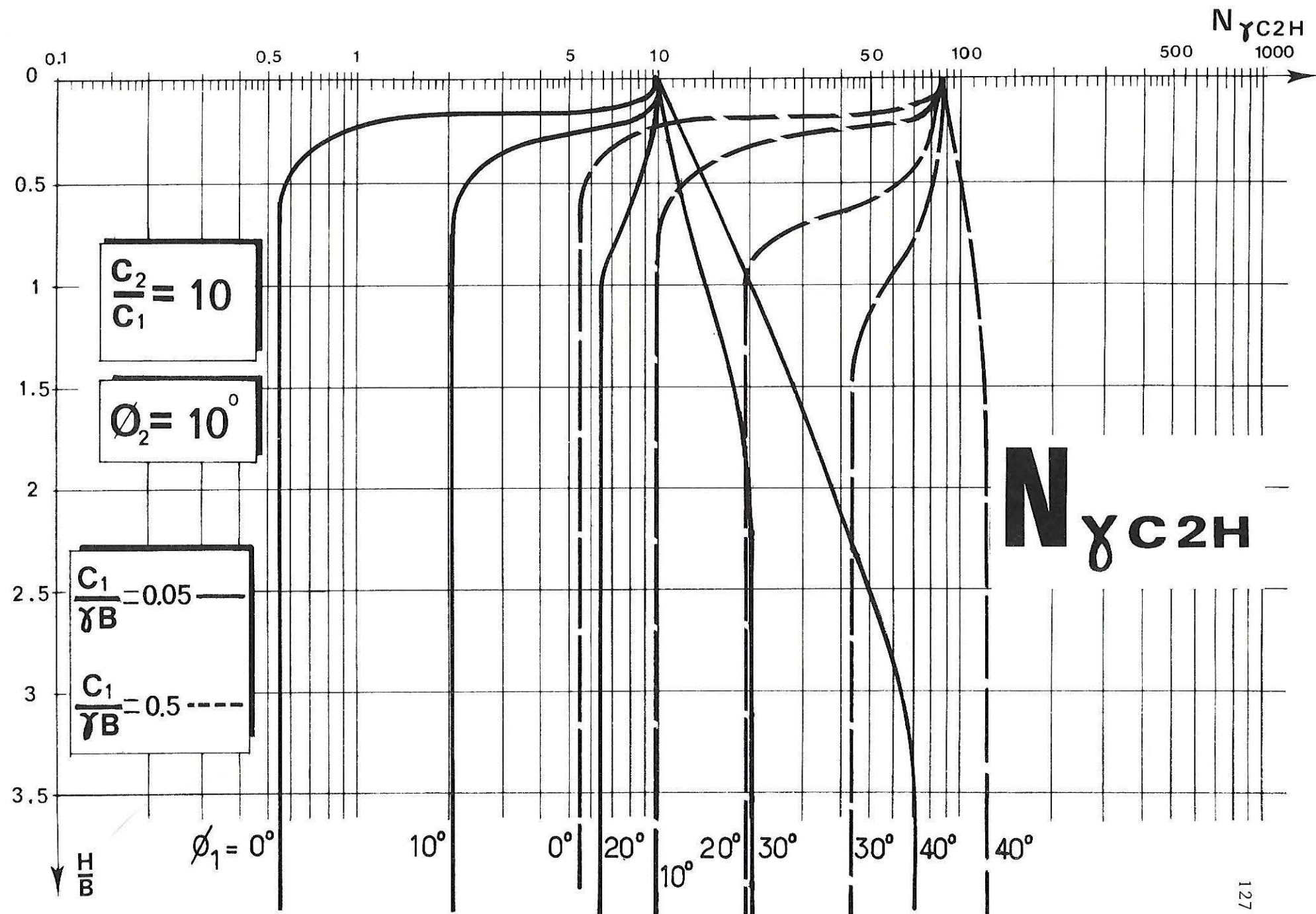
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	9.82 86.09 848.97 8477.73	9.82 86.09 848.97 8477.73	9.82 86.09 848.97 8477.73	9.82 86.09 848.97 8477.73	9.82 86.09 848.97 8477.73	0.05 0.5 5 50
0.1	8.76 78.23 772.85 7719.10	9.23 81.10 799.06 7978.67	9.68 83.72 824.06 8227.47	10.12 86.42 849.39 8479.08	10.55 89.16 875.41 8737.96	0.05 0.5 5 50
0.2	1.19 11.93 119.37 1193.70	8.58 75.32 742.57 7415.09	9.54 81.07 796.23 7947.94	10.45 86.65 848.92 8471.67	11.45 92.22 900.37 8982.05	0.05 0.5 5 50
0.3	0.77 7.78 77.85 778.54	3.85 25.26 239.41 2380.90	9.38 77.99 764.32 7627.68	10.82 86.84 847.44 8453.14	12.27 94.80 920.58 9178.54	0.05 0.5 5 50
0.4	0.61 6.19 61.95 619.50	2.71 16.14 150.42 1493.25	9.19 74.29 725.53 7238.07	11.27 86.63 840.94 8384.16	13.18 97.54 942.01 9386.90	0.05 0.5 5 50
0.5	0.57 5.72 57.21 572.19	2.20 12.09 111.17 1101.99	8.93 63.79 548.04 5387.55	11.65 86.03 830.67 8277.23	14.22 100.10 960.20 9561.51	0.05 0.5 5 50
1	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.74 155.62 1508.62	14.35 57.14 391.54 3736.84	20.27 111.35 1022.14 10130.86	0.05 0.5 5 50
1.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	18.65 43.49 269.66 2531.90	28.23 118.47 960.59 8841.47	0.05 0.5 5 50
2	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	38.29 118.47 598.61 5379.98	0.05 0.5 5 50
2.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	50.42 118.47 560.56 4933.70	0.05 0.5 5 50
3	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	64.90 118.47 560.56 4933.70	0.05 0.5 5 50
$\frac{H}{B} \geq 3.5$	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	71.79 118.47 560.56 4933.70	0.05 0.5 5 50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 10$

$\phi_2 = 10^\circ$



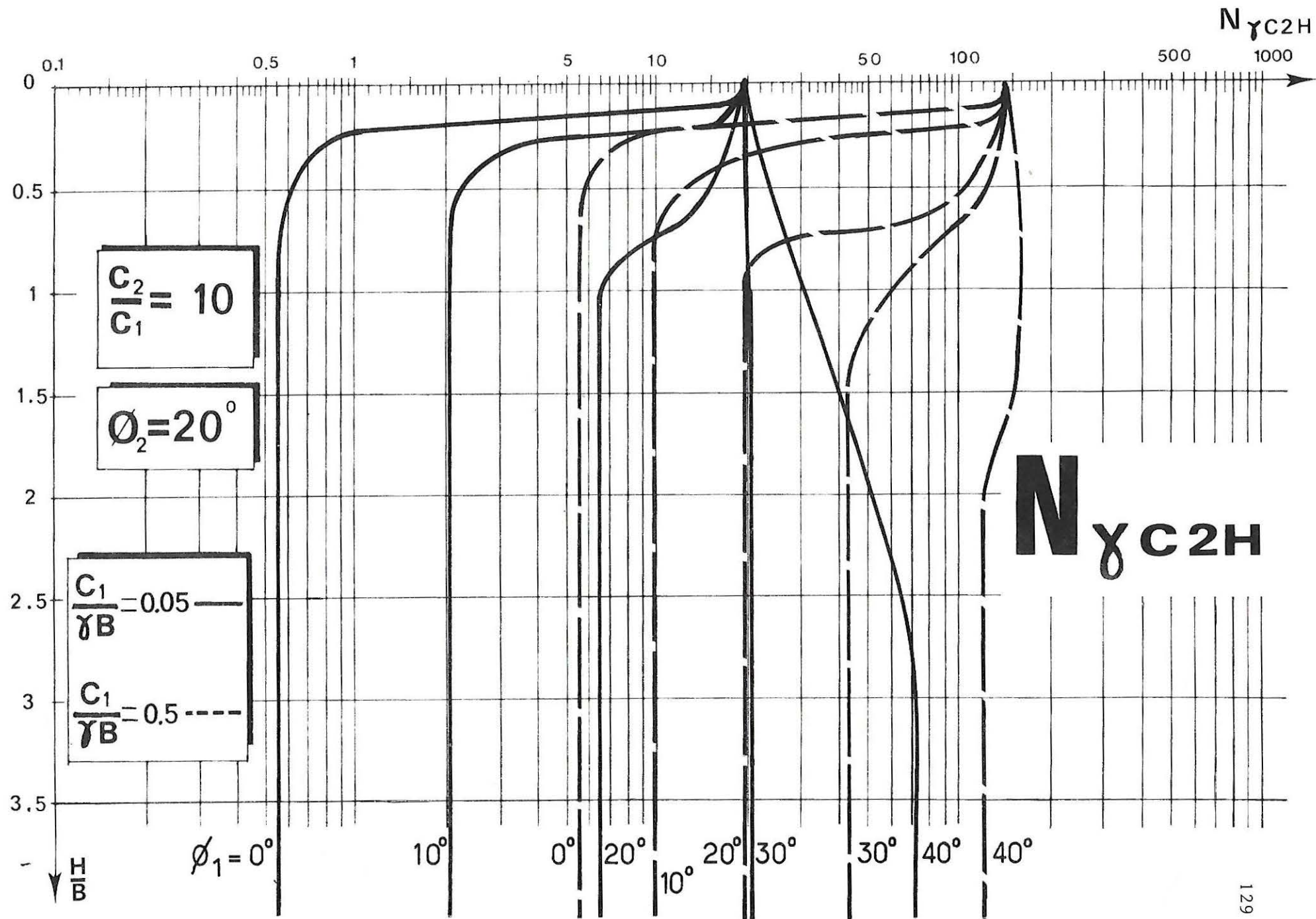
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	19.22	19.22	19.22	19.22	19.22	0.05
	143.92	143.92	143.92	143.92	143.92	0.5
	1387.54	1387.54	1387.54	1387.54	1387.54	5
	13822.70	13822.70	13822.70	13822.70	13822.70	50
0.1	16.93	17.72	18.51	19.33	20.19	0.05
	129.28	133.52	137.84	141.76	145.68	0.5
	1251.91	1294.74	1328.35	1363.38	1398.65	5
	12476.80	12900.74	13231.87	13578.67	13928.54	50
0.2	1.19	16.08	17.77	19.44	21.18	0.05
	11.93	122.34	131.07	139.38	147.44	0.5
	119.37	1183.29	1266.61	1336.57	1410.28	5
	1193.70	11792.91	12616.98	13312.80	14038.90	50
0.3	0.77	3.85	16.93	19.56	22.15	0.05
	7.78	25.26	123.70	136.76	149.35	0.5
	77.85	239.41	1191.41	1307.37	1419.68	5
	778.54	2380.90	11868.68	13013.77	14122.22	50
0.4	0.61	2.71	16.01	19.67	23.42	0.05
	6.19	16.14	115.56	133.84	150.65	0.5
	61.95	150.42	1111.59	1274.89	1424.48	5
	619.50	1493.25	11070.63	12685.68	14163.22	50
0.5	0.57	2.20	14.86	19.79	24.40	0.05
	5.72	12.09	104.95	130.54	151.90	0.5
	57.21	111.17	892.37	1238.33	1428.90	5
	572.19	1101.99	8766.66	12316.55	14199.39	50
1	0.55	2.02	6.42	20.19	31.02	0.05
	5.55	9.82	19.74	57.14	156.00	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	1409.97	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	13947.42	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	39.87	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	150.05	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	960.59	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	8841.47	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	51.16	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	121.24	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	598.61	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5379.98	50
2.5	0.55	2.02	6.42	20.47	65.20	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50
$\frac{H}{B} = 3$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 10$

$\phi_2 = 20^\circ$



7-5

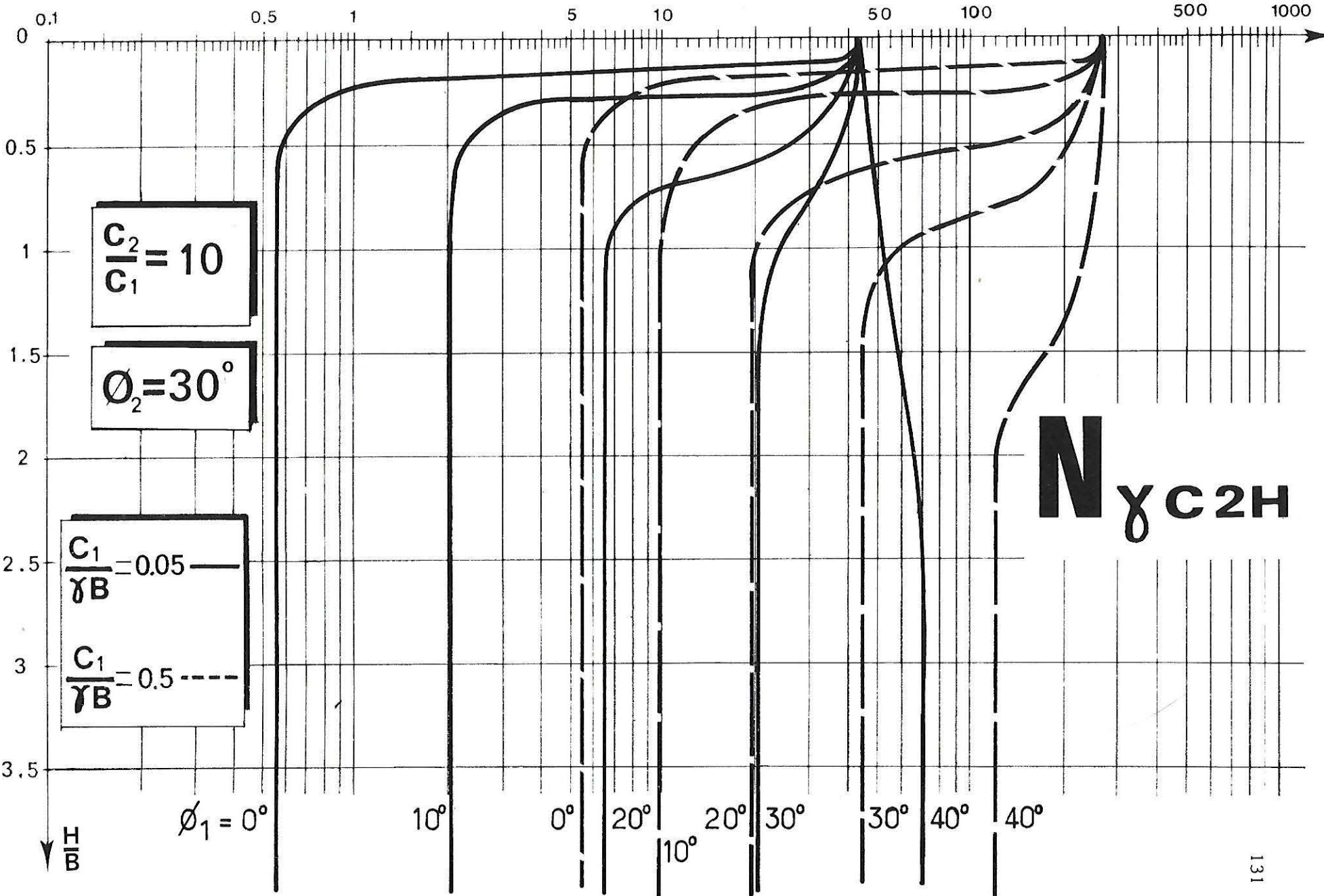
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	43.49 265.07 2465.57 24470.97	43.49 265.07 2465.57 24470.97	43.49 265.07 2465.57 24470.97	43.49 265.07 2465.57 24470.97	43.49 265.07 2465.57 24470.97	0.05 0.5 5 50
0.1	37.62 237.32 2220.87 22054.60	39.25 243.65 2276.22 22602.12	40.82 250.11 2334.16 23175.29	42.50 256.84 2390.19 23717.49	44.29 263.59 2444.22 24251.36	0.05 0.5 5 50
0.2	1.19 11.93 119.37 1193.70	34.80 220.97 2078.62 20655.59	38.19 235.11 2196.37 21804.06	41.49 248.48 2311.55 22942.92	45.01 261.93 2421.10 24013.71	0.05 0.5 5 50
0.3	0.77 7.78 77.85 778.54	3.85 25.26 239.41 2380.90	35.34 218.79 2050.86 20372.00	40.45 239.96 2226.59 22093.68	45.78 260.11 2395.97 23755.59	0.05 0.5 5 50
0.4	0.61 6.19 61.95 619.50	2.71 16.14 150.42 1493.25	32.23 201.78 1890.98 18780.20	39.36 230.65 2139.65 21224.57	46.54 258.10 2368.54 23474.06	0.05 0.5 5 50
0.5	0.57 5.72 57.21 572.19	2.20 12.09 111.17 1101.99	26.23 104.95 892.37 8766.66	38.25 220.96 2043.32 20267.72	47.34 255.89 2338.47 23165.53	0.05 0.5 5 50
1	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.74 155.62 1508.62	23.87 57.14 391.54 3736.84	51.94 240.07 2128.11 21010.33	0.05 0.5 5 50
1.5	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 269.66 2531.90	58.12 172.84 960.59 8841.47	0.05 0.5 5 50
2	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	67.19 121.24 598.61 5379.98	0.05 0.5 5 50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	0.55 5.55 55.57 555.72	2.02 9.82 86.09 848.97	6.42 19.22 143.92 1387.54	20.47 43.49 265.07 2465.57	71.79 118.47 560.56 4933.70	0.05 0.5 5 50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 10$

$\phi_2 = 30^\circ$

$N_{\gamma C2H}$



7-5

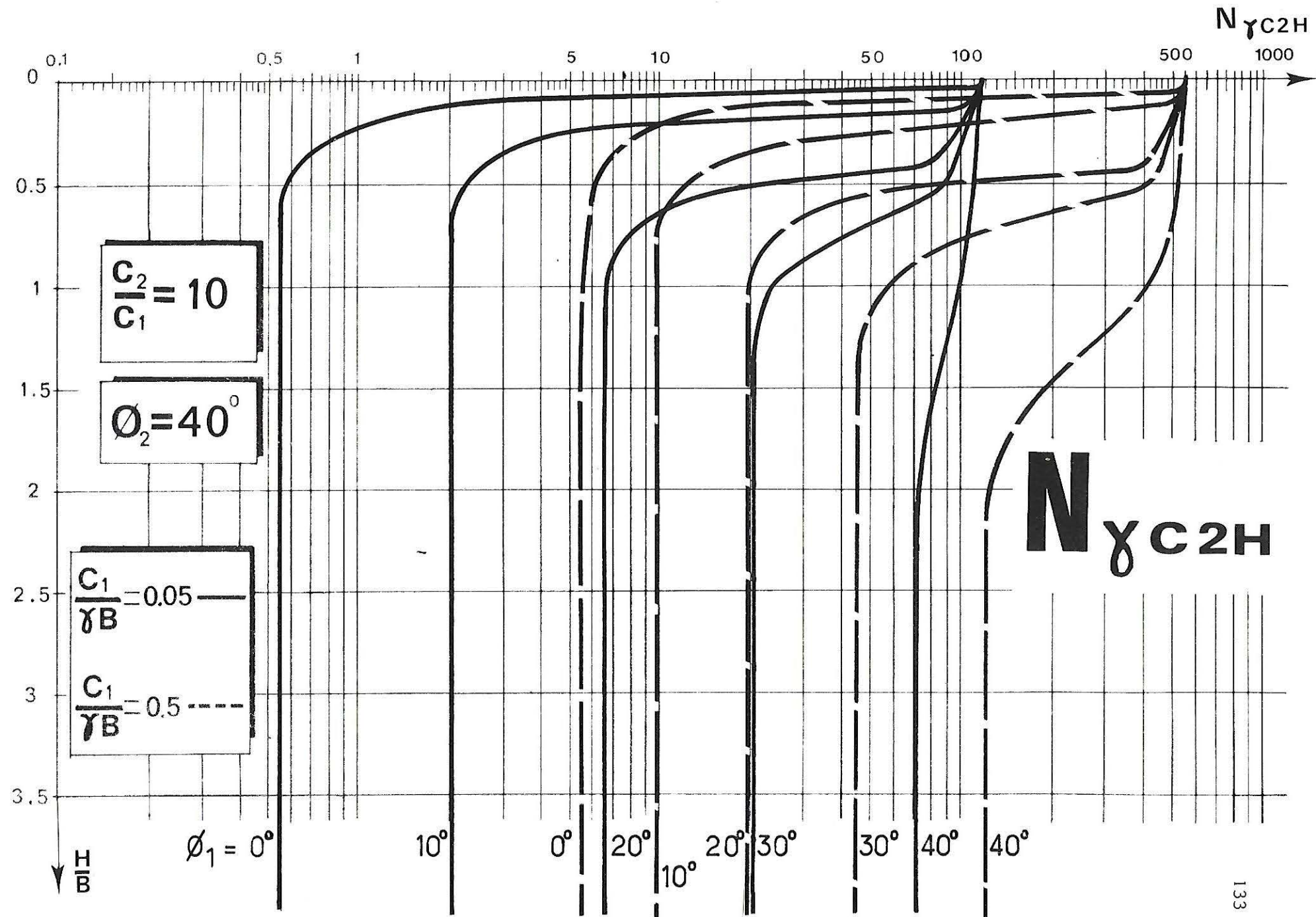
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 0^\circ$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_1}{\gamma B}$
0	118.47	118.47	118.47	118.47	118.47	0.05
	560.56	560.56	560.56	560.56	560.56	0.5
	4933.70	4933.70	4933.70	4933.70	4933.70	5
	48654.24	48654.24	48654.24	48654.24	48654.24	50
0.1	2.31	105.13	109.15	112.98	117.05	0.05
	23.15	512.64	525.16	537.35	549.36	0.5
	231.53	4544.67	4639.41	4737.83	4828.92	5
	2315.36	44847.55	45778.46	46713.18	47607.18	50
0.2	1.19	22.62	99.68	107.76	115.61	0.05
	11.93	163.36	489.00	513.51	538.08	0.5
	119.37	1570.87	4340.33	4531.22	4723.33	5
	1193.70	15645.97	42851.68	44697.28	46551.97	50
0.3	0.77	3.85	90.41	102.07	114.16	0.05
	7.78	25.26	450.65	489.53	526.68	0.5
	77.85	239.41	4033.47	4326.36	4614.31	5
	778.54	2380.90	39841.72	42695.97	45486.94	50
0.4	0.61	2.71	80.75	96.62	112.68	0.05
	6.19	16.14	411.30	464.16	515.06	0.5
	61.95	150.42	3697.73	4113.64	4499.52	5
	619.50	1493.25	36563.80	40586.45	44346.63	50
0.5	0.57	2.20	26.23	90.95	111.17	0.05
	5.72	12.09	104.95	437.34	502.46	0.5
	57.21	111.17	892.37	3885.10	4383.20	5
	572.19	1101.99	8766.66	38365.00	43184.00	50
1	0.55	2.02	6.42	23.87	102.86	0.05
	5.55	9.82	19.74	57.14	430.16	0.5
	55.57	86.09	155.62	391.54	3707.98	5
	555.72	848.97	1508.62	3736.84	36477.32	50
1.5	0.55	2.02	6.42	20.47	83.75	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	172.84	0.5
	55.57	86.09	143.92	269.66	960.59	5
	555.72	848.97	1387.54	2531.90	8841.47	50
2	0.55	2.02	6.42	20.47	71.89	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	121.24	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	598.61	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	5379.98	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	0.55	2.02	6.42	20.47	71.79	0.05
	5.55	9.82	19.22	43.49	118.47	0.5
	55.57	86.09	143.92	265.07	560.56	5
	555.72	848.97	1387.54	2465.57	4933.70	50

$N_{\gamma C2H}$

$\frac{C_2}{C_1} = 10$

$\phi_2 = 40^\circ$



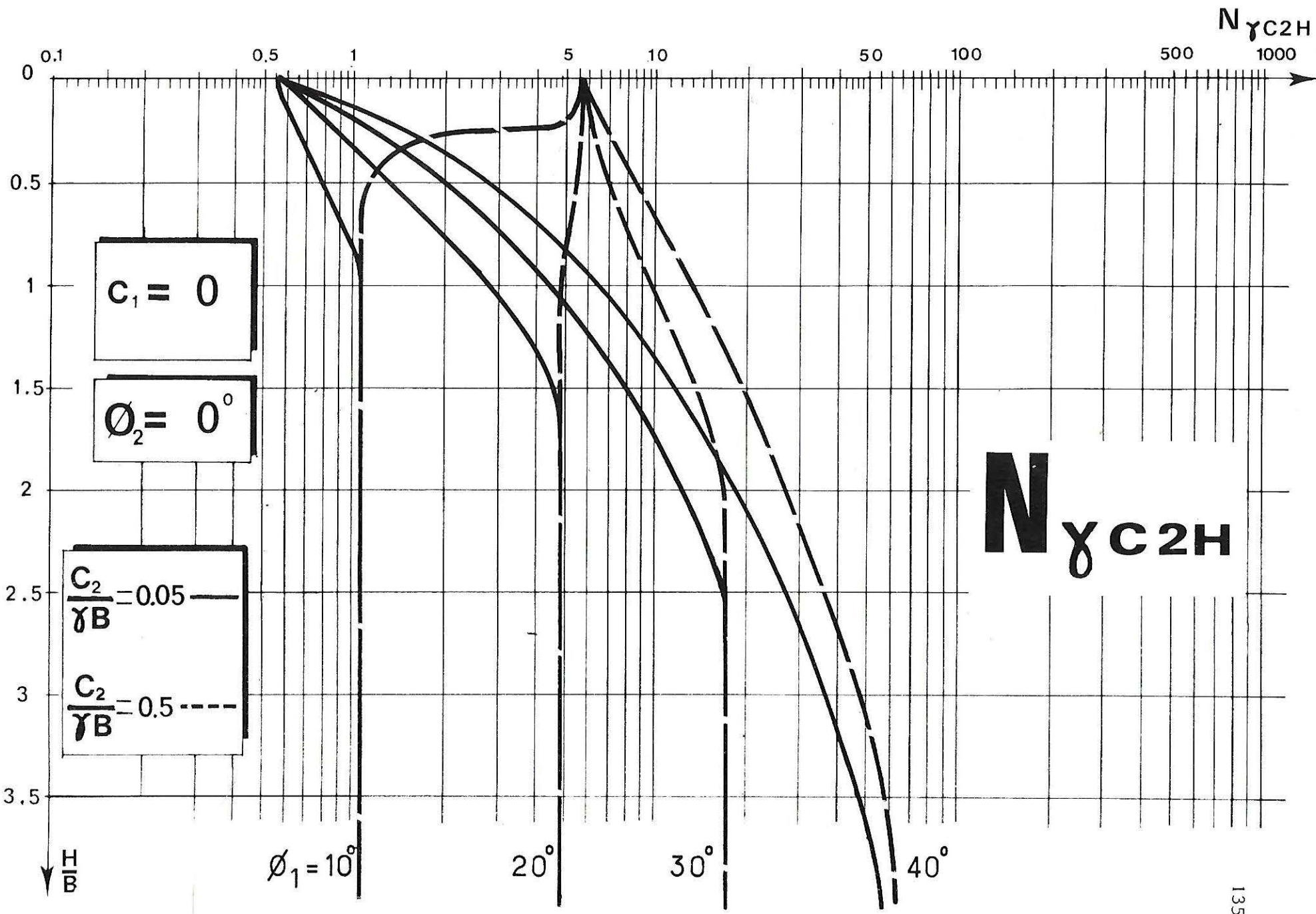
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_2}{\gamma B}$
0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.05
	5.55	5.55	5.55	5.55	0.5
	55.57	55.57	55.57	55.57	5
	555.72	555.72	555.72	555.72	50
0.1	0.58	0.67	0.76	0.86	0.05
	5.29	5.55	5.81	6.06	0.5
	52.37	54.36	56.30	58.18	5
	523.19	542.46	561.26	579.47	50
0.2	0.62	0.81	1.02	1.23	0.05
	5.02	5.56	6.11	6.66	0.5
	6.98	53.09	57.11	61.10	5
	6.98	528.41	567.24	605.60	50
0.3	0.67	0.98	1.31	1.66	0.05
	1.48	5.57	6.45	7.27	0.5
	1.48	51.43	57.89	63.49	5
	1.48	510.13	572.26	626.03	50
0.4	0.72	1.17	1.64	2.16	0.05
	1.23	5.57	6.79	7.96	0.5
	1.23	49.02	58.47	65.89	5
	1.23	483.17	574.84	645.58	50
0.5	0.79	1.38	2.01	2.72	0.05
	1.10	5.56	7.17	8.68	0.5
	1.10	17.50	58.15	68.23	5
	1.10	17.50	568.03	664.33	50
1	1.06	2.75	4.43	6.39	0.05
	1.06	4.82	9.73	13.26	0.5
	1.06	4.82	20.21	77.70	5
	1.06	4.82	20.21	712.44	50
1.5	1.06	4.70	7.84	11.59	0.05
	1.06	4.82	13.50	19.38	0.5
	1.06	4.82	17.70	76.28	5
	1.06	4.82	17.70	85.67	50
2	1.06	4.82	12.31	18.39	0.05
	1.06	4.82	17.70	27.19	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.45	5
	1.06	4.82	17.70	66.45	50
2.5	1.06	4.82	17.70	26.82	0.05
	1.06	4.82	17.70	36.74	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50
3	1.06	4.82	17.70	36.88	0.05
	1.06	4.82	17.70	48.00	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50
3.5	1.06	4.82	17.70	48.56	0.05
	1.06	4.82	17.70	60.94	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50
$\frac{H}{B} \approx 4$	1.06	4.82	17.70	66.43	0.05
	1.06	4.82	17.70	66.43	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50

$N_{\gamma C2H}$

$C_1 = 0$

$\phi_2 = 0^\circ$



$N_{\gamma C2H}$

7-5

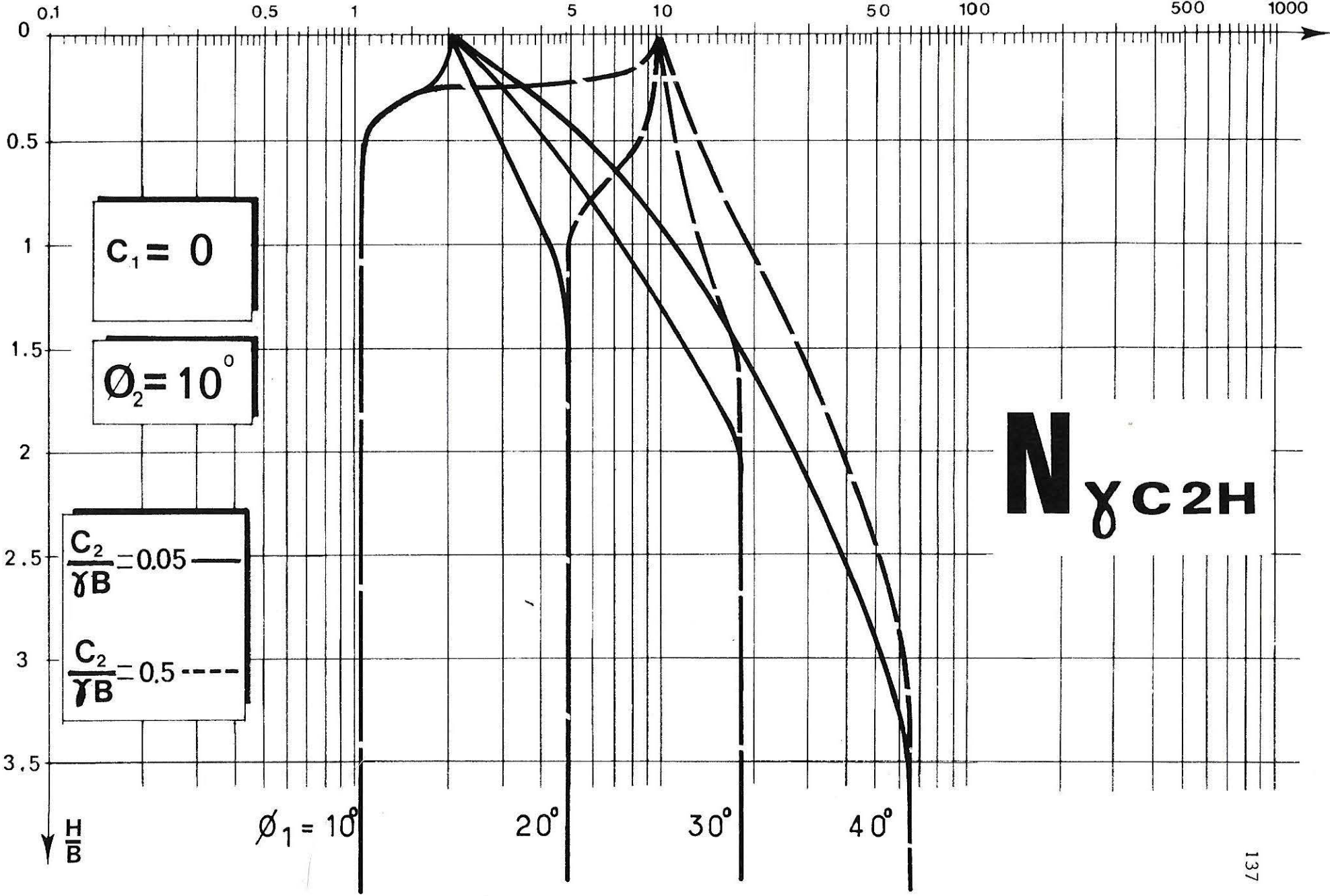
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_2}{\gamma B}$
0	2.02	2.02	2.02	2.02	0.05
	9.82	9.82	9.82	9.82	0.5
	86.09	86.09	86.09	86.09	5
	848.97	848.97	848.97	848.97	50
0.1	1.93	2.16	2.39	2.63	0.05
	9.17	9.65	10.06	10.49	0.5
	80.51	83.15	85.86	88.58	5
	793.51	818.35	843.76	869.61	50
0.2	1.84	2.32	2.81	3.28	0.05
	6.98	9.45	10.33	11.32	0.5
	6.98	79.86	85.43	91.08	5
	6.98	784.19	836.73	889.03	50
0.3	1.40	2.49	3.28	4.04	0.05
	1.48	9.21	10.62	12.08	0.5
	1.48	75.95	85.24	93.05	5
	1.48	744.06	831.01	903.13	50
0.4	1.16	2.69	3.77	4.82	0.05
	1.23	8.93	11.00	12.92	0.5
	1.23	71.08	84.09	94.95	5
	1.23	693.50	815.73	921.91	50
0.5	1.10	2.92	4.27	5.68	0.05
	1.10	8.43	11.30	13.91	0.5
	1.10	17.50	82.54	96.97	5
	1.10	17.50	795.52	929.03	50
1	1.06	4.40	7.58	11.13	0.05
	1.06	4.82	13.73	19.57	0.5
	1.06	4.82	20.21	102.92	5
	1.06	4.82	20.21	931.49	50
1.5	1.06	4.82	11.99	18.36	0.05
	1.06	4.82	17.36	27.44	0.5
	1.06	4.82	17.70	85.67	5
	1.06	4.82	17.70	85.67	50
2	1.06	4.82	17.69	27.59	0.05
	1.06	4.82	17.70	36.96	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.45	5
	1.06	4.82	17.70	66.45	50
2.5	1.06	4.82	17.70	38.88	0.05
	1.06	4.82	17.70	48.84	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50
3	1.06	4.82	17.70	52.28	0.05
	1.06	4.82	17.70	63.01	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50
$\frac{H}{B} = 3.5$	1.06	4.82	17.70	66.43	0.05
	1.06	4.82	17.70	66.43	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50

$N_{\gamma C2H}$

$c_1 = 0$

$\phi_2 = 10^\circ$

$N_{\gamma C2H}$



$N_{\gamma C2H}$

$C_1 = 0$

$\phi_2 = 10^\circ$

$\frac{C_2}{\gamma B} = 0.05$ —
 $\frac{C_2}{\gamma B} = 0.5$ - - -

$\phi_1 = 10^\circ$

20°

30°

40°

H/B

7-5

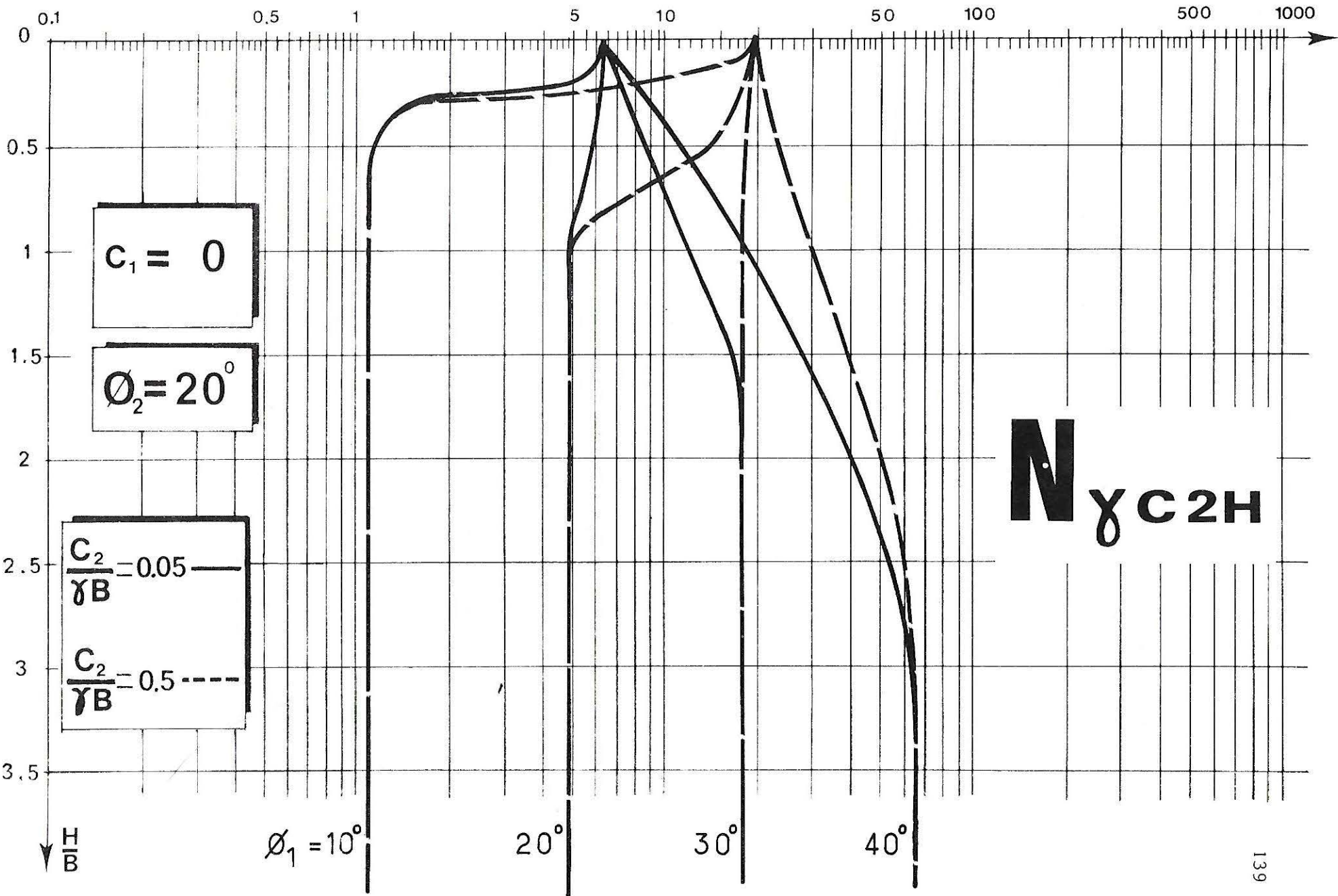
$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{c_2}{\gamma B}$
0	6.42	6.42	6.42	6.42	0.05
	19.22	19.22	19.22	19.22	0.5
	143.92	143.92	143.92	143.92	5
	1387.54	1387.54	1387.54	1387.54	50
0.1	5.76	6.27	6.81	7.30	0.05
	17.64	18.43	19.25	20.11	0.5
	132.81	137.11	141.08	145.00	5
	1283.10	1321.81	1356.80	1391.89	50
0.2	5.11	6.16	7.22	8.27	0.05
	6.98	17.59	19.45	21.02	0.5
	6.98	129.58	137.98	145.99	5
	6.98	1248.26	1322.60	1395.86	50
0.3	1.48	6.10	7.66	9.39	0.05
	1.48	16.66	19.29	21.91	0.5
	1.48	121.26	134.57	147.02	5
	1.48	1167.07	1285.52	1398.90	50
0.4	1.23	5.96	8.14	10.44	0.05
	1.23	15.61	19.30	22.86	0.5
	1.23	111.90	130.74	147.69	5
	1.23	1075.05	1244.36	1394.93	50
0.5	1.10	5.74	8.64	11.58	0.05
	1.10	14.20	19.30	23.94	0.5
	1.10	17.50	126.16	147.92	5
	1.10	17.50	1195.98	1389.24	50
1	1.06	4.82	11.87	18.66	0.05
	1.06	4.82	18.74	30.07	0.5
	1.06	4.82	20.21	146.20	5
	1.06	4.82	20.21	1302.65	50
1.5	1.06	4.82	16.59	27.93	0.05
	1.06	4.82	17.70	38.88	0.5
	1.06	4.82	17.70	85.67	5
	1.06	4.82	17.70	85.67	50
2	1.06	4.82	17.70	39.09	0.05
	1.06	4.82	17.70	49.26	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.45	5
	1.06	4.82	17.70	66.45	50
2.5	1.06	4.82	17.70	52.72	0.05
	1.06	4.82	17.70	62.82	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50
$\frac{H}{B} \geq 3$	1.06	4.82	17.70	66.43	0.05
	1.06	4.82	17.70	66.43	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50

$N_{\gamma C2H}$

$c_1 = 0$

$\phi_2 = 20^\circ$

$N_{\gamma C2H}$



$N_{\gamma C2H}$

7-5

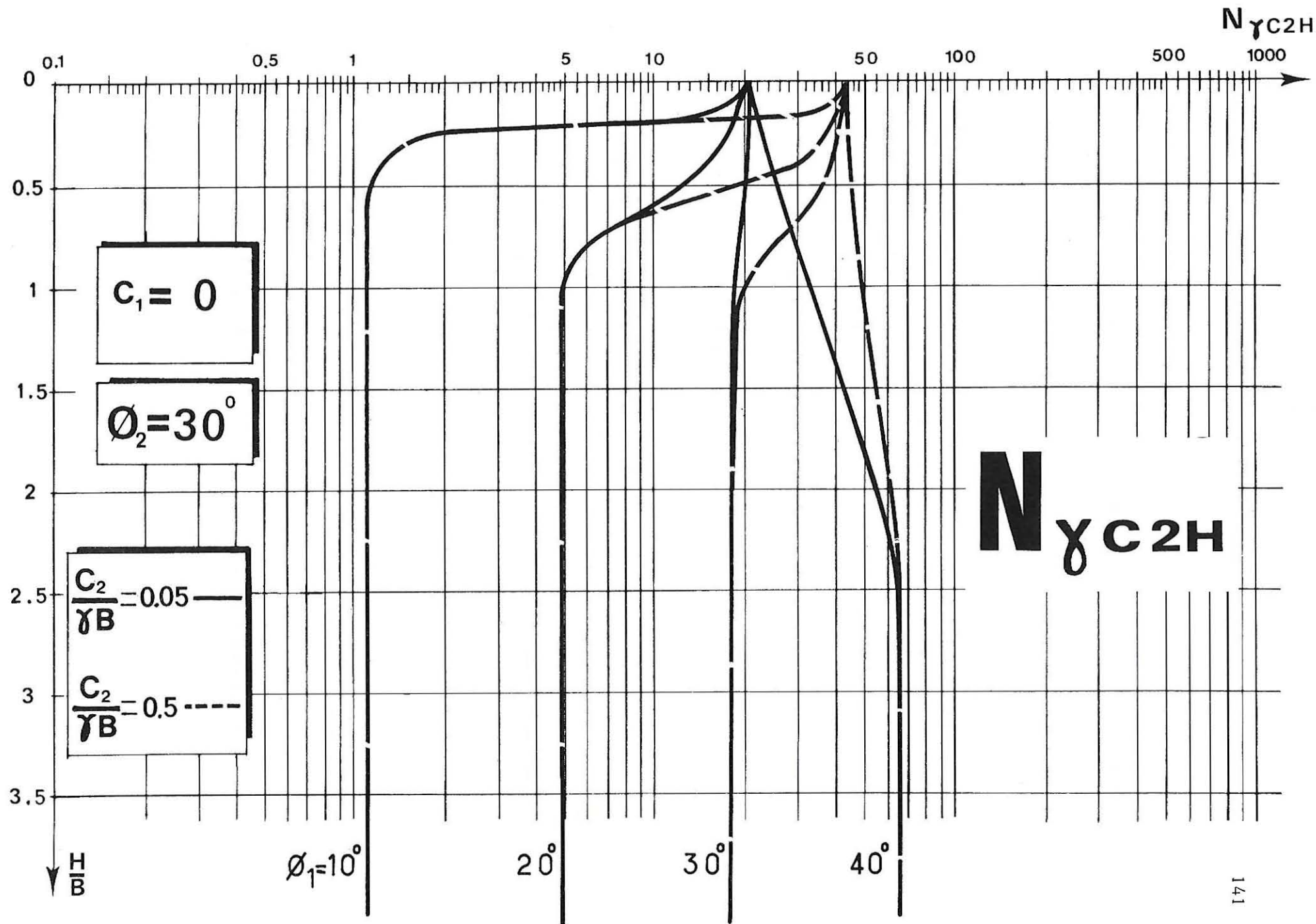
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_2}{\gamma B}$
0	20.47	20.47	20.47	20.47	0.05
	43.49	43.49	43.49	43.49	0.5
	265.07	265.07	265.07	265.07	5
	2465.57	2465.57	2465.57	2465.57	50
0.1	17.88	19.07	20.34	21.50	0.05
	39.14	40.72	42.39	44.18	0.5
	242.73	249.22	255.93	262.73	5
	2267.56	2325.28	2381.82	2435.65	50
0.2	6.98	17.71	20.22	22.56	0.05
	6.98	37.96	41.27	44.80	0.5
	6.98	233.82	246.64	260.16	5
	6.98	2178.94	2293.19	2403.44	50
0.3	1.48	16.37	20.00	23.69	0.05
	1.48	34.98	40.12	45.63	0.5
	1.48	215.78	237.06	257.36	5
	1.48	2020.75	2198.81	2368.62	50
0.4	1.23	14.90	19.85	24.87	0.05
	1.23	31.72	38.94	46.04	0.5
	1.23	197.60	226.63	254.32	5
	1.23	1850.20	2099.93	2330.81	50
0.5	1.10	13.14	19.70	26.20	0.05
	1.10	17.50	37.61	46.74	0.5
	1.10	17.50	215.61	250.98	5
	1.10	17.50	1992.51	2289.56	50
1	1.06	4.82	18.61	33.35	0.05
	1.06	4.82	20.21	50.70	0.5
	1.06	4.82	20.21	226.97	5
	1.06	4.82	20.21	1995.57	50
1.5	1.06	4.82	17.70	42.75	0.05
	1.06	4.82	17.70	55.88	0.5
	1.06	4.82	17.70	85.67	5
	1.06	4.82	17.70	85.67	50
2	1.06	4.82	17.70	54.21	0.05
	1.06	4.82	17.70	64.29	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.45	5
	1.06	4.82	17.70	66.45	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	1.06	4.82	17.70	66.43	0.05
	1.06	4.82	17.70	66.43	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50

$N_{\gamma C2H}$

$c_1 = 0$

$\phi_2 = 30^\circ$



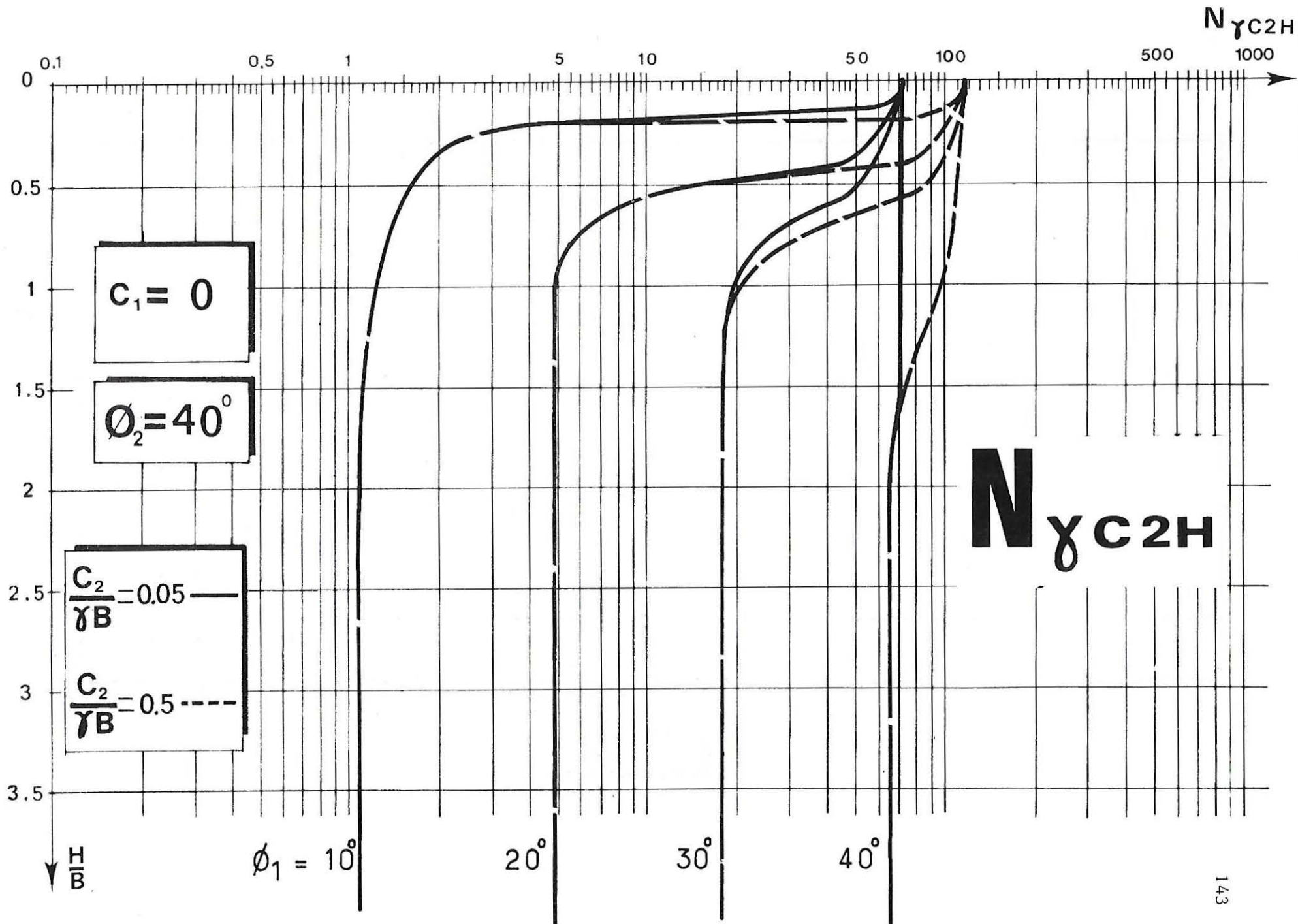
7-5

$\frac{H}{B}$	$\phi_1 = 10^\circ$	$\phi_1 = 20^\circ$	$\phi_1 = 30^\circ$	$\phi_1 = 40^\circ$	$\frac{C_2}{\gamma B}$
0	71.79	71.79	71.79	71.79	0.05
	118.47	118.47	118.47	118.47	0.5
	560.56	560.56	560.56	560.56	5
	4933.69	4933.69	4933.69	4933.69	50
0.1	62.41	65.59	68.50	71.62	0.05
	104.97	109.00	112.83	116.89	0.5
	511.40	523.89	536.13	548.12	5
	4533.05	4627.55	4725.70	4817.28	50
0.2	6.98	59.14	65.40	71.44	0.05
	6.98	99.37	107.46	115.29	0.5
	6.98	486.42	510.95	535.58	5
	6.98	4316.34	4507.41	4699.97	50
0.3	1.48	52.82	61.93	71.25	0.05
	1.48	89.92	101.59	113.68	0.5
	1.48	446.67	485.53	522.92	5
	1.48	3993.84	4288.89	4576.86	50
0.4	1.23	46.28	58.51	71.07	0.05
	1.23	80.09	95.99	112.03	0.5
	1.23	405.84	458.51	509.63	5
	1.23	3643.29	4062.38	4449.35	50
0.5	1.10	17.50	55.50	70.88	0.05
	1.10	17.50	90.10	110.36	0.5
	1.10	17.50	430.43	495.63	5
	1.10	17.50	3816.25	4320.13	50
1	1.06	4.82	20.21	69.86	0.05
	1.06	4.82	20.21	100.91	0.5
	1.06	4.82	20.21	413.09	5
	1.06	4.82	20.21	3541.63	50
1.5	1.06	4.82	17.70	68.52	0.05
	1.06	4.82	17.70	76.28	0.5
	1.06	4.82	17.70	85.67	5
	1.06	4.82	17.70	85.67	50
2	1.06	4.82	17.70	66.43	0.05
	1.06	4.82	17.70	66.45	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.45	5
	1.06	4.82	17.70	66.45	50
$\frac{H}{B} \geq 2.5$	1.06	4.82	17.70	66.43	0.05
	1.06	4.82	17.70	66.43	0.5
	1.06	4.82	17.70	66.43	5
	1.06	4.82	17.70	66.43	50

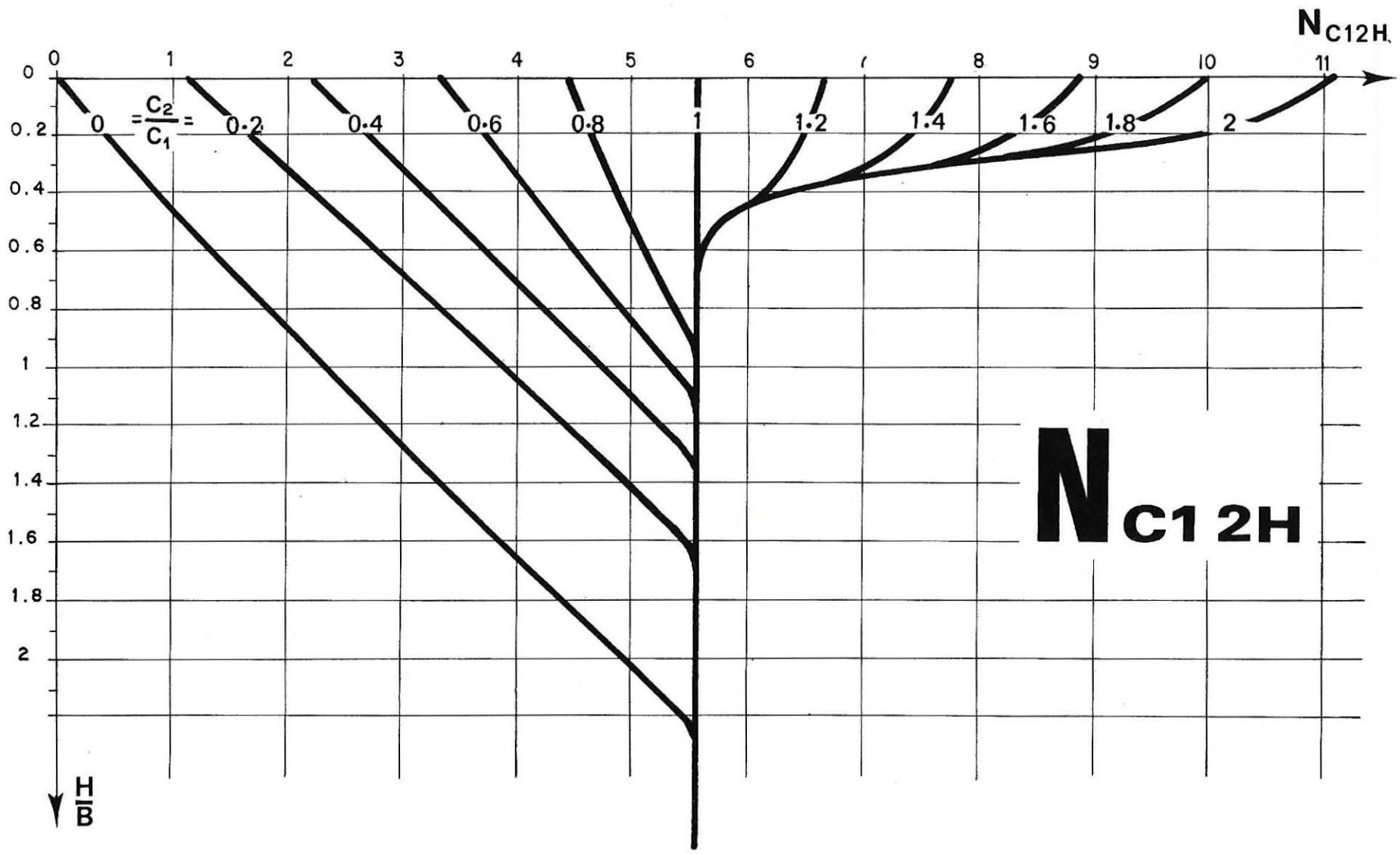
$N_{\gamma C_2 H}$

$C_1 = 0$

$\phi_2 = 40^\circ$

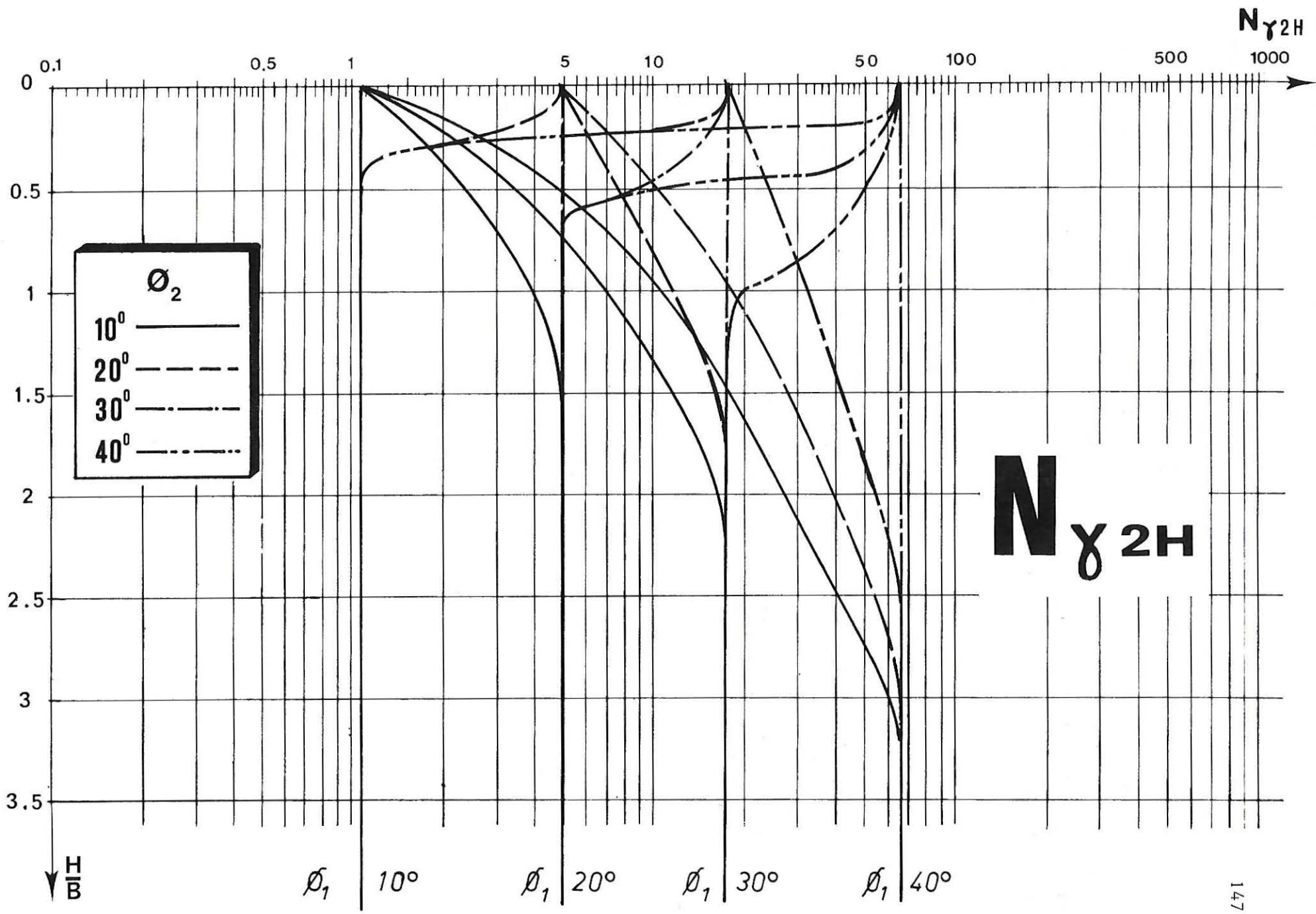


7-5



N_y2H

$\frac{\phi_2}{H/B}$	10°				20°				30°				40°			
	10°	20°	30°	40°	10°	20°	30°	40°	10°	20°	30°	40°	10°	20°	30°	40°
0	1.06	1.06	1.06	1.06	4.82	4.82	4.82	4.82	17.70	17.70	17.70	17.70	66.43	66.43	66.43	66.43
0.2	1.06	1.51	1.95	2.39	3.84	4.82	5.82	6.81	13.17	15.43	17.70	20.02	47.89	54.35	60.50	66.43
0.4	1.06	2.01	2.93	3.92	1.10	4.82	6.90	9.06	1.10	12.94	17.70	22.53	1.10	42.43	54.15	66.43
0.6	1.06	2.58	4.07	5.73	1.06	4.82	8.11	11.51	1.06	5.49	17.70	25.30	1.06	5.49	47.83	66.43
0.8	1.06	3.22	5.37	7.80	1.06	4.82	9.52	14.32	1.06	4.82	17.70	28.16	1.06	4.82	36.75	66.43
1.0	1.06	3.98	6.83	10.17	1.06	4.82	11.07	17.37	1.06	4.82	17.70	31.47	1.06	4.82	19.77	66.43
1.2	1.06	4.41	8.47	12.82	1.06	4.82	12.80	20.83	1.06	4.82	17.70	34.89	1.06	4.82	17.70	66.43
1.4	1.06	4.82	10.31	15.77	1.06	4.82	14.81	24.58	1.06	4.82	17.70	38.78	1.06	4.82	17.70	66.43
1.6	1.06	4.82	12.31	19.00	1.06	4.82	17.00	28.65	1.06	4.82	17.70	43.15	1.06	4.82	17.70	66.43
1.8	1.06	4.82	14.54	22.61	1.06	4.82	17.70	33.13	1.06	4.82	17.70	47.74	1.06	4.82	17.70	66.43
2.0	1.06	4.82	17.02	26.49	1.06	4.82	17.70	37.91	1.06	4.82	17.70	52.79	1.06	4.82	17.70	66.43
2.2	1.06	4.82	17.70	30.73	1.06	4.82	17.70	43.07	1.06	4.82	17.70	58.39	1.06	4.82	17.70	66.43
2.4	1.06	4.82	17.70	35.38	1.06	4.82	17.70	48.56	1.06	4.82	17.70	64.59	1.06	4.82	17.70	66.43
2.6	1.06	4.82	17.70	41.36	1.06	4.82	17.70	54.51	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43
2.8	1.06	4.82	17.70	49.99	1.06	4.82	17.70	62.07	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43
3.0	1.06	4.82	17.70	66.01	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43
3.2	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43
3.4	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43	1.06	4.82	17.70	66.43



7-5

BIBLIOGRAPHIE

L'étude théorique de cette question est due à Obin, travaillant en collaboration avec Giroud, et l'on trouve dans sa thèse [2] les premiers résultats numériques. Dans le cas particulier d'un sol purement cohérent ($\phi_1 = \phi_2 \neq 0$), nos résultats concordent bien avec l'abaque publié par Button [1].

REFERENCES

- [1] S.J. BUTTON, "The bearing capacity of footings resting on a two-layers cohesive subsoil", Comptes Rendus du 3^e Congrès International de Mécanique des Sols, 1 (Zürich, 1953), 332-335.
- [2] J.P. OBIN, "Force portante en déformation plane d'un sol verticalement non homogène", Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Grenoble (Février 1972).

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol horizontal dont la cohésion varie avec la profondeur

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Remarque importante
- Calcul de la pression limite
- Table et Graphique
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est limité supérieurement par un plan horizontal. Il est formé de deux couches (*). La première, d'épaisseur $H + D$, a un angle de frottement nul et une cohésion qui varie linéairement de la valeur c_0 au niveau de la base de la fondation jusqu'à c_2 à l'interface. La seconde couche, d'épaisseur infinie, a un angle de frottement nul et une cohésion constante c_2 (Fig. 1). Le contact entre les deux couches se fait en mobilisant, s'il le faut, la totalité de la cohésion (autrement dit, la contrainte tangentielle sur l'interface est, au plus, égale à c_2).

Le poids volumique, γ , qui intervient dans le calcul de la pression limite est celui de la partie supérieure du sol d'épaisseur D .

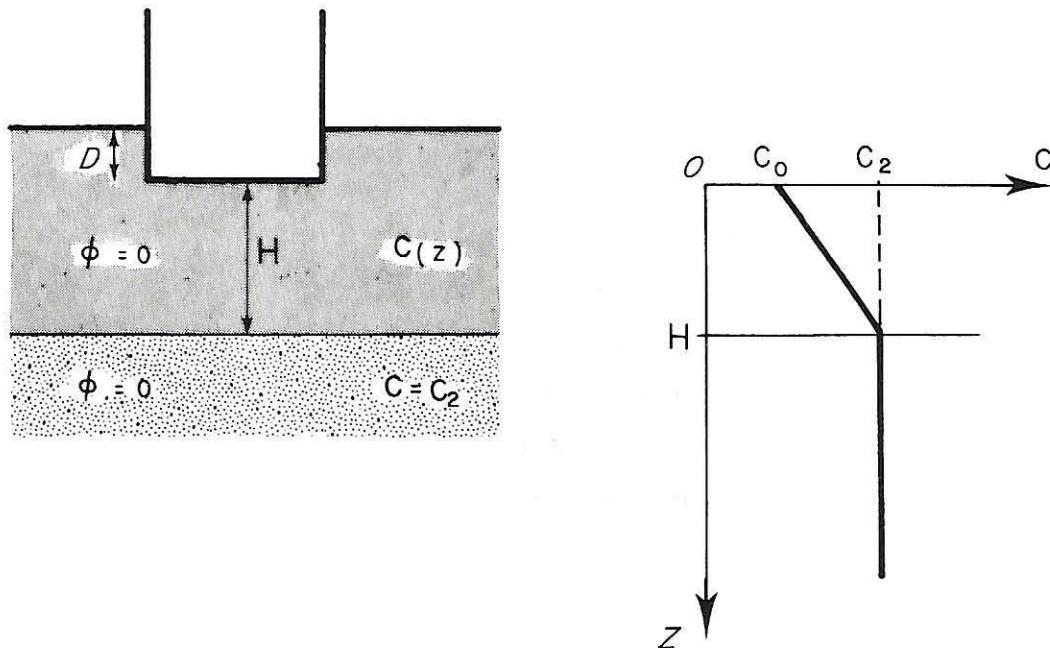


FIG. 1. — Définition du sol et de la fondation.

(*) Les résultats de cette section sont également utilisables dans le cas où le sol est formé d'une seule couche, d'épaisseur infinie, dont la cohésion varie linéairement avec la profondeur (voir le texte qui suit la formule (2)).

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B. Sa base horizontale, située à la profondeur D, est rigide (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge verticale centrée dont la valeur limite (à la rupture) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite moyenne ou pression portante, est donnée par :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B}$$

REMARQUE IMPORTANTE

Les valeurs de la pression limite calculées à l'aide des formules de cette section doivent être regardées avec la plus grande prudence. En effet, les coefficients de force portante utilisés ci-après ont été obtenus par une méthode approchée particulière (*) et leurs valeurs peuvent ne pas concorder avec celles des coefficients des autres sections, eux-mêmes calculés avec d'autres approximations. Ceci est vrai, en particulier, si l'on veut comparer les résultats de la présente section (sol dont la cohésion varie avec la profondeur) à ceux de la section 7-1 (sol homogène). Ceci est illustré par l'exemple 1.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(2) \quad p_{\text{lim}} = c_0 N_{cz}^0 + \gamma D$$

avec :

c_0 : cohésion au niveau de la base de la fondation (qui, en général, n'est pas à la surface du sol)

γ : poids volumique du sol dans la partie supérieure d'épaisseur D

D : profondeur de la base de la fondation

(*) Cette méthode, utilisée également pour les sections 7-5 et 7-7, est celle des cercles de glissement alors que, dans toutes les autres sections, l'étude théorique a été faite en supposant l'équilibre limite atteint dans tout le massif (voir l'avant-propos de ce volume).

N_{cz}^0 : coefficient sans dimensions dépendant de c_2/c_0 et de H/B et dont les valeurs numériques se trouvent dans une table et un graphique

c_2 : cohésion du sol de la couche inférieure

H : distance entre la base de la fondation et l'interface (Fig. 1)

B : largeur de la fondation.

Notons que si H/B est supérieur à 3,2 les propriétés de la couche inférieure n'interviennent pas dans le calcul des valeurs de N_{cz}^0 . Alors tout se passe comme si la cohésion augmentait indéfiniment avec la profondeur. Cette remarque sera utilisée dans l'exemple 2 pour calculer la pression portante d'un sol composé d'une seule couche dont la cohésion varie avec la profondeur.

Exemple 1 :

Considérons une fondation de largeur $B = 1,8$ m (6 ft) enfoncée de 90 cm (3 ft) dans un sol dont la cohésion varie de 0,5 bar (1 050 lb/sq. ft) au niveau de la base à 0,8 bar (1 680 lb/sq. ft) à une profondeur de 2,7 m (9 ft) au-dessous de la base. Au-delà de cette profondeur, la cohésion demeure constante. Le poids volumique du sol, au voisinage de la surface, est de 2 t/m³ (125 lb/cu. ft). Quelle est la pression limite de cette fondation ?

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned}\gamma D &= 2\,000 \times 9,81 \times 0,9 = 0,18 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 0,18 \text{ bar} \\ &= 125 \times 3 = 375 \text{ lb/sq. ft.}\end{aligned}$$

Calculons ensuite :

$$\frac{c_2}{c_0} = \frac{0,8}{0,5} = \frac{1\,680}{1\,050} = 1,6$$

$$\frac{H}{B} = \frac{2,7}{1,8} = \frac{9}{6} = 1,5.$$

Pour ces deux valeurs, on lit dans la table ou sur le graphique :

$$N_{cz}^0 = 6,42$$

D'où :

$$\begin{aligned}P_{lim} &= 0,5 \times 6,42 + 0,18 = 3,39 \text{ bars} \\ &= 1\,050 \times 6,42 + 375 = 7\,125 \text{ lb/sq. ft.}\end{aligned}$$

Si la sol avait eu une cohésion constante depuis la surface, égale à 0,8 bar (1 680 lb/sq. ft), on aurait pu calculer la pression limite de deux façons différentes :

- Soit en posant $c_2 = 0,8$ bar (1 680 lb/sq. ft)

d'où $c_2/c_0 = 1,6$, ce qui donne :

$$N_{cz}^0 = 8,88 \text{ (valeur lue dans le tableau pour } H/B = 0).$$

D'où :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 8,88 \times 0,5 + 0,18 = 4,62 \text{ bars} \\ &= 8,88 \times 1\ 050 + 375 = 9\ 700 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

- Soit en posant $c_0 = c_2 = 0,8$ bar,

d'où $c_2/c_0 = 1$, ce qui donne quel que soit H/B :

$$N_{cz}^0 = 5,55.$$

D'où :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 5,55 \times 0,8 + 0,18 = 4,62 \text{ bars} \\ &= 5,55 \times 1\ 680 + 375 = 9\ 700 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Notons que, pour comparer le cas du sol dont la cohésion varie avec la profondeur avec le cas du sol homogène, il vaut mieux procéder comme nous venons de le faire plutôt que de se reporter à la section 7-1 relative au sol homogène. En effet, dans la section 7-1, le coefficient de force portante vaut 5,14, au lieu de 5,55 ici, ce qui fausse la comparaison. Cet écart vient du fait que la méthode de calcul utilisée pour obtenir les résultats numériques des sections 7-1 et 7-6 est différente comme nous l'avons signalé plus haut (voir "Remarque Importante").

Exemple 2 :

Considérons une fondation de largeur $B = 1,8$ m (6 ft) placée sur un sol dont la cohésion varie linéairement avec la profondeur suivant la formule :

$$c = 0,5 + 0,16 z \text{ (c en bars, z en mètres)}$$

$$c = 1\ 050 + 100 z \text{ (c en lb/sq. ft, z en ft)}$$

Quelle est la pression limite ?

Comme nous l'avons dit plus haut, il suffit de considérer que la couche supérieure a une épaisseur H supérieure à 3,2 fois la largeur de la fondation pour que les propriétés de la couche inférieure n'interviennent pas et que, par conséquent, tout se passe comme si la cohésion augmentait indéfiniment avec la profondeur.

Prenons donc $H = 3,5 B$ puisque c'est la première valeur supérieure à 3,2 que l'on trouve dans la table de N_{cz}^0 , soit :

$$H = 3,5 B = 6,3 \text{ m (21 ft)}.$$

A cette profondeur, la cohésion vaut :

$$\begin{aligned} c_2 &= 0,5 + 0,16 \times 6,3 = 1,5 \text{ bar} \\ &= 1\ 050 + 100 \times 21 = 3\ 150 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

D'où :

$$\frac{c_2}{c_0} = \frac{1,5}{0,5} = \frac{2\ 150}{1\ 050} = 3.$$

On lit alors, dans la table et le graphique pour $H/B = 3,5$ et $c_2/c_0 = 3$:

$$N_{cz}^0 = 6,78.$$

On en déduit la pression limite par la formule (2) :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 6,78 \times 0,5 = 3,39 \text{ bars} \\ &= 6,78 \times 1\ 050 = 7\ 100 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

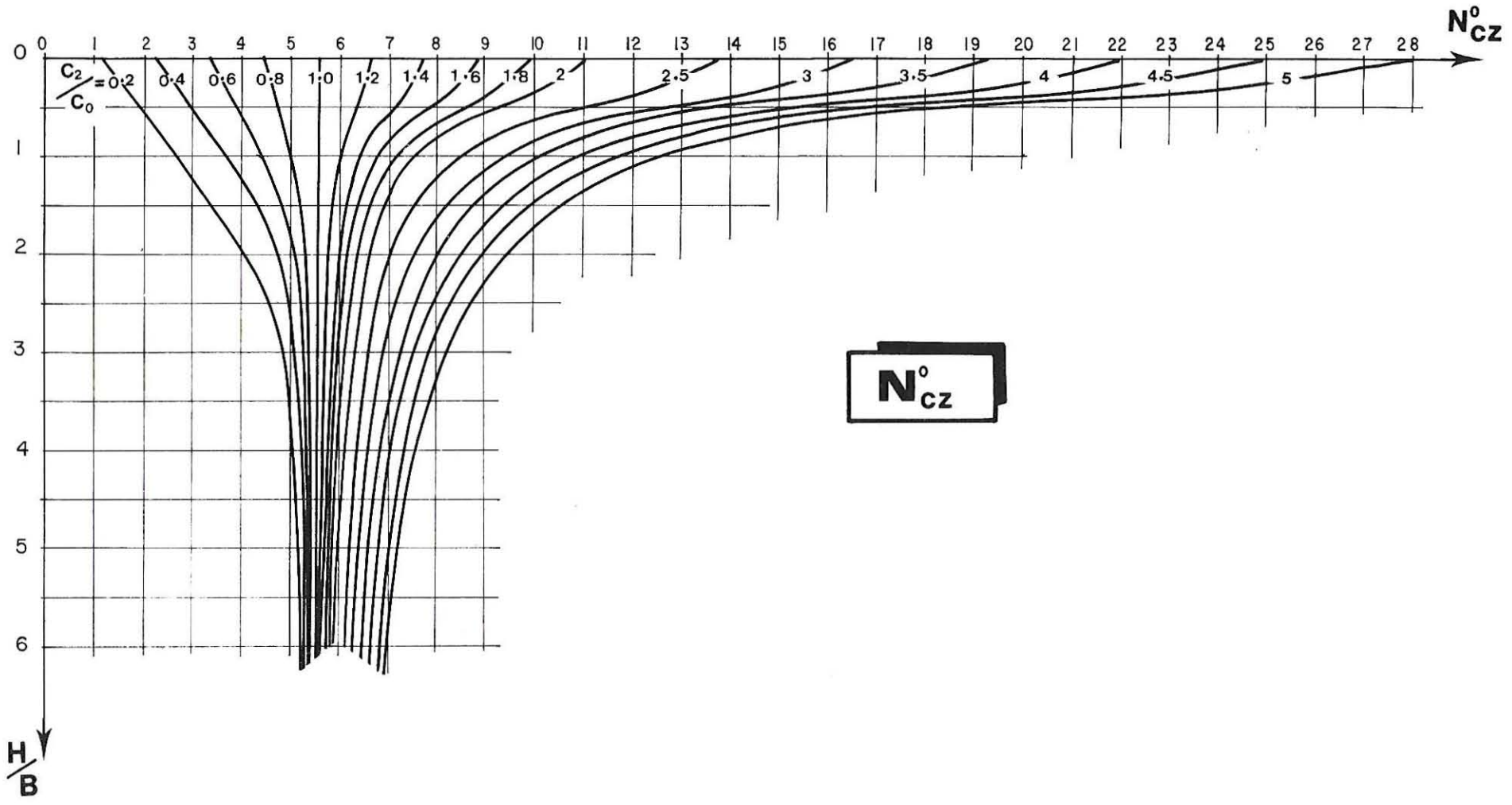
TABLE ET GRAPHIQUE

N_{ez}^0 p. 156-157

7-6

N^ocz

$\frac{C_2}{C_0}$ H B	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0	1.11	2.22	3.33	4.44	5.55	6.66	7.78	8.89	10.00	11.11	13.89	16.67	19.45	22.22	25.00	27.78
0.1	1.29	2.37	3.43	4.49	5.55	6.61	7.68	8.74	9.80	10.86	13.52	16.18	18.83	21.49	24.14	26.80
0.2	1.45	2.50	3.53	4.54	5.55	6.56	7.58	8.59	9.59	10.60	13.11	15.62	18.12	20.63	23.14	25.65
0.3	1.60	2.63	3.63	4.59	5.55	6.51	7.46	8.41	9.35	10.29	12.65	15.00	17.36	19.71	22.07	24.42
0.4	1.76	2.76	3.72	4.65	5.55	6.45	7.33	8.21	9.08	9.96	12.12	14.11	16.04	17.97	19.90	21.83
0.5	1.91	2.89	3.82	4.71	5.55	6.38	7.18	7.96	8.70	9.38	11.02	12.56	14.11	15.65	17.20	18.74
0.6	2.06	3.02	3.92	4.78	5.55	6.28	6.96	7.59	8.21	8.82	10.22	11.54	12.82	14.11	15.40	16.68
0.7	2.20	3.16	4.02	4.84	5.55	6.18	6.78	7.32	7.86	8.39	9.62	10.80	11.90	13.01	14.11	15.21
0.8	2.35	3.30	4.13	4.90	5.55	6.10	6.63	7.12	7.59	8.06	9.17	10.22	11.21	12.18	13.14	14.11
0.9	2.49	3.44	4.25	4.98	5.55	6.05	6.51	6.96	7.38	7.80	8.82	9.75	10.68	11.54	12.39	13.25
1	2.63	3.60	4.39	5.05	5.55	6.00	6.42	6.84	7.21	7.59	8.52	9.38	10.22	11.02	11.79	12.56
1.5	3.35	4.36	4.85	5.24	5.55	5.86	6.14	6.42	6.70	6.96	7.59	8.21	8.82	9.38	9.94	10.50
2	4.06	4.74	5.05	5.31	5.55	5.79	6.00	6.21	6.42	6.63	7.12	7.59	8.06	8.52	8.96	9.38
2.5	4.67	4.93	5.17	5.36	5.55	5.74	5.92	6.08	6.25	6.42	6.84	7.21	7.59	7.96	8.34	8.70
3	4.85	5.05	5.24	5.39	5.55	5.71	5.86	6.00	6.14	6.28	6.63	6.96	7.28	7.59	7.90	8.21
3.5	4.96	5.14	5.28	5.42	5.55	5.69	5.82	5.94	6.06	6.18	6.48	6.78	7.05	7.32	7.59	7.86
4	5.05	5.20	5.31	5.43	5.55	5.67	5.79	5.89	6.00	6.10	6.37	6.63	6.89	7.12	7.35	7.59
4.5	5.12	5.24	5.34	5.45	5.55	5.66	5.76	5.86	5.95	6.05	6.28	6.51	6.75	6.96	7.17	7.38
5	5.17	5.27	5.36	5.46	5.55	5.65	5.74	5.83	5.92	6.00	6.21	6.42	6.63	6.84	7.03	7.21
5.5	5.21	5.29	5.38	5.47	5.55	5.64	5.72	5.81	5.88	5.96	6.15	6.34	6.53	6.73	6.91	7.08
6	5.24	5.31	5.39	5.47	5.55	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.10	6.28	6.45	6.63	6.80	6.96



BIBLIOGRAPHIE

Cette question a été étudiée d'abord par Button [1] qui a établi un graphique de valeurs numériques et ensuite par Obin [2]. La table et le graphique plus complets donnés ici n'ont fait l'objet d'aucune publication préalable.

REFERENCES

- 7-6
- [1] S.J. BUTTON, "The bearing capacity of footings resting on a two-layers cohesive subsoil", Comptes Rendus du 3^e Congrès International de Mécanique des Sols, 1 (Zürich, 1953), 332-335.
- [2] J.P. OBIN, "Force portante en déformation plane d'un sol verticalement non homogène", Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Grenoble (Février 1972).

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol horizontal contenant une nappe phréatique

7-7

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Remarque importante
- Calcul de la pression limite
- Graphique
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est homogène et ses propriétés mesurées dans un essai drainé (*) sont : c' , cohésion et ϕ' , angle de frottement. La nappe phréatique se trouve à la profondeur H (Fig. 1). Sa présence ne modifie pas les "propriétés mécaniques drainées" du sol, c' et ϕ' . Elle joue seulement sur le poids volumique qui intervient dans le calcul de stabilité du sol dans l'état drainé : γ' (poids volumique immergé) au-dessous de la nappe et γ_d (poids volumique sec) au-dessus. Ces deux poids volumiques ne sont d'ailleurs pas indépendants :

$$(1) \quad \gamma' = \frac{G - 1}{G} \gamma_d$$

avec :

G : densité des grains du sol.

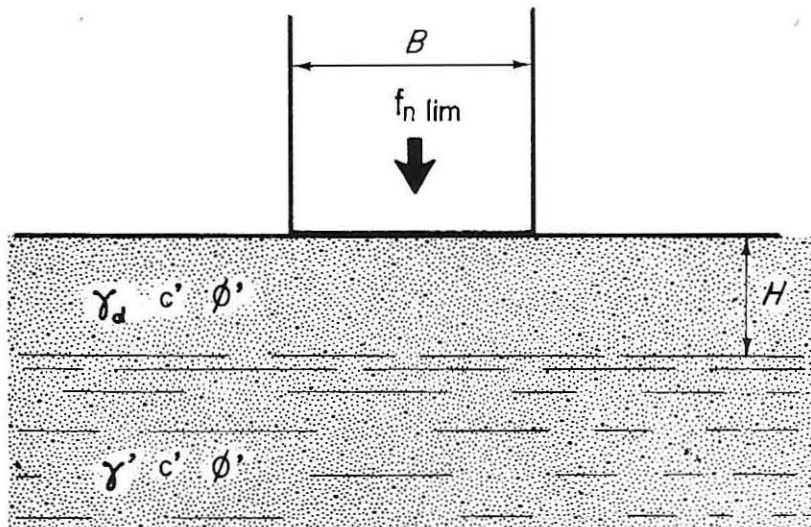


FIG. 1. — Définition du sol, du niveau de la nappe et de la charge.

(*) Cette section ne permet donc deux calculs : soit celui de la pression limite d'un sol très perméable, soit celui de la pression limite à long terme d'un sol peu perméable (voir, au début de ce volume, l'"Introduction au calcul des forces portantes", § 3b).

Notons que, pour les valeurs de G comprises entre 2,65 et 2,75 (c'est-à-dire pour la quasi-totalité des sols), l'expression $(G - 1)/G$ est pratiquement constante :

$$2,65 \leq G \leq 2,75 \longrightarrow \frac{G - 1}{G} \approx 0,63.$$

D'où :

$$(2) \quad \gamma' \approx 0,63 \gamma_d.$$

Il est exact de considérer que le sol situé au-dessus de la nappe est sec (poids volumique γ_d) s'il s'agit d'un matériau très perméable (sable, gravier, ...). Au contraire, un sol fin (silt, argile) est en général humide au-dessus de la nappe du fait de l'ascension capillaire. Mais, dans ce cas, prendre le poids volumique sec, γ_d , va dans le sens de la sécurité.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B . Sa base horizontale, située à la surface du sol, est rigide (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge verticale centrée dont la valeur limite (à la rupture) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite moyenne, ou pression portante, est donnée par :

$$(3) \quad P_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B}.$$

REMARQUE IMPORTANTE

Les valeurs de la pression limite calculées à l'aide des formules de cette section doivent être regardées avec la plus grande prudence. En effet, les coefficients de force portante utilisés ci-après ont été obtenus par une méthode approchée particulière (*) et leurs valeurs peuvent ne pas concorder avec celles des coefficients des autres sections, eux-mêmes calculés avec d'autres approximations. Ceci est vrai, en particulier, si l'on veut comparer les résultats de la présente section

(*) Cette méthode, utilisée également pour les sections 7-5 et 7-6, est celle des cercles de glissement alors que, dans toutes les autres sections, l'étude théorique a été faite en supposant l'équilibre limite atteint dans tout le massif (voir l'avant-propos du volume 3).

(sol homogène avec nappe) à ceux de la section 7-1 (sol homogène sans nappe). Il est donc recommandé de procéder de la façon suivante :

1. On calcule la pression limite en présence de nappe à l'aide de la formule (5) ci-après. Soit $p_{lim 1}$.
2. On calcule la pression limite en l'absence de nappe à l'aide de la même formule en prenant, dans le graphique, la valeur vers laquelle tend $N'_{\gamma c}$ pour $H/B = \infty$. Soit $p_{lim 2}$.
3. On recalcule la pression limite en l'absence de nappe directement à l'aide de la section 7-1. Soit $p_{lim 3}$.

Les cas 1 et 2 peuvent être comparés parce qu'ils sont traités à l'aide de la même méthode. Le cas 3 fournit sinon une valeur exacte du moins une valeur de référence parce que calculée à l'aide de la méthode classique. Par conséquent, si l'on veut que la pression limite en présence de nappe, $p_{lim 1}$, puisse être comparée à celle du sol sans nappe calculée à l'aide de la méthode classique, $p_{lim 3}$, il faudra d'abord lui appliquer un terme correctif :

$$(4) \quad p_{lim 1 \text{ corrigé}} = p_{lim 1} \times \frac{p_{lim 3}}{p_{lim 2}}$$

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(5) \quad p_{lim} = \frac{1}{2} \gamma_d B N'_{\gamma c}$$

avec :

- γ_d : poids volumique du sol sec
- B : largeur de la fondation
- $N'_{\gamma c}$: coefficient sans dimensions dépendant de ϕ' , $c'/\gamma_d B$ et H/B et dont les valeurs numériques sont données dans un graphique
- ϕ' : angle de frottement du sol mesuré dans un essai drainé
- c' : cohésion du sol mesurée dans un essai drainé
- H : profondeur du niveau de la nappe.

La formule (5) ne concerne que le cas du sol drainé. Elle ne permet donc le calcul de la pression limite que dans les cas suivants (*) :

- sol très perméable comme le sable ou le gravier (alors $c' = 0$)
- sol peu perméable (argile) : dans ce cas, uniquement calcul de la pression limite à long terme.

Exemple :

Soit un gravier compact de cohésion nulle, d'angle de frottement 40° et de densité sèche 1,84 (115 lb/cu. ft) contenant une nappe à la profondeur de 90 cm (3 ft). Quelle pression limite peut exercer une fondation de 1,2 m (4 ft) de large établie à la surface de ce sol ?

Pour :

$$\frac{H}{B} = \frac{0,9}{1,2} = \frac{3}{4} = 0,75$$

on lit sur le graphique :

$$N'_{\gamma c} = 54.$$

La pression limite en présence de nappe s'obtient alors par la formule (5) :

$$P_{\text{lim } 1} = \frac{1}{2} \cdot 1840 \times 9,81 \times 1,20 \times 54 = 590\,000 \text{ N/m}^2 = 5,9 \text{ bars}$$

$$P_{\text{lim } 1} = \frac{1}{2} \cdot 115 \times 4 \times 54 = 12\,400 \text{ lb/sq. ft.}$$

Calculons à l'aide de la même formule la pression limite en l'absence de nappe : pour cela, considérons la valeur $H/B = \infty$ dans le graphique. On lit :

$$N'_{\gamma c} = 66.$$

Un calcul analogue au précédent donne :

$$P_{\text{lim } 2} = 7,2 \text{ bars (15 100 lb/sq. ft.)}$$

Mais, comme nous l'avons dit dans la "Remarque Importante" ci-dessus, il est intéressant de calculer cette pression limite à l'aide de la section 7-1. Pour $c = 0$ et $D = 0$, on y voit que la pression limite a pour expression :

$$P_{\text{lim } 3} = \frac{1}{2} \gamma_{BN} N_{\gamma}$$

$$\text{pour } \phi = 40^\circ : N_{\gamma} = 100.$$

(*) Voir, au début de ce volume, l'"Introduction au calcul des forces portantes", § 3b.

D'où :

$$P_{\text{lim } 3} = 10,8 \text{ bars (23 000 lb/sq. ft.)}$$

On peut alors, à l'aide de la formule (4), corriger la pression limite en présence de la nappe, calculée à l'aide de la formule (5) qui n'est qu'approchée, pour pouvoir la comparer à la pression limite sans nappe, $P_{\text{lim } 3}$, calculée à l'aide de la formule classique de la section 7-1 :

$$\begin{aligned} P_{\text{lim corrigée}} &= 5,9 \times \frac{10,8}{7,2} = 8,9 \text{ bars} \\ &= 12\,400 \times \frac{23\,000}{15\,100} = 18\,800 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

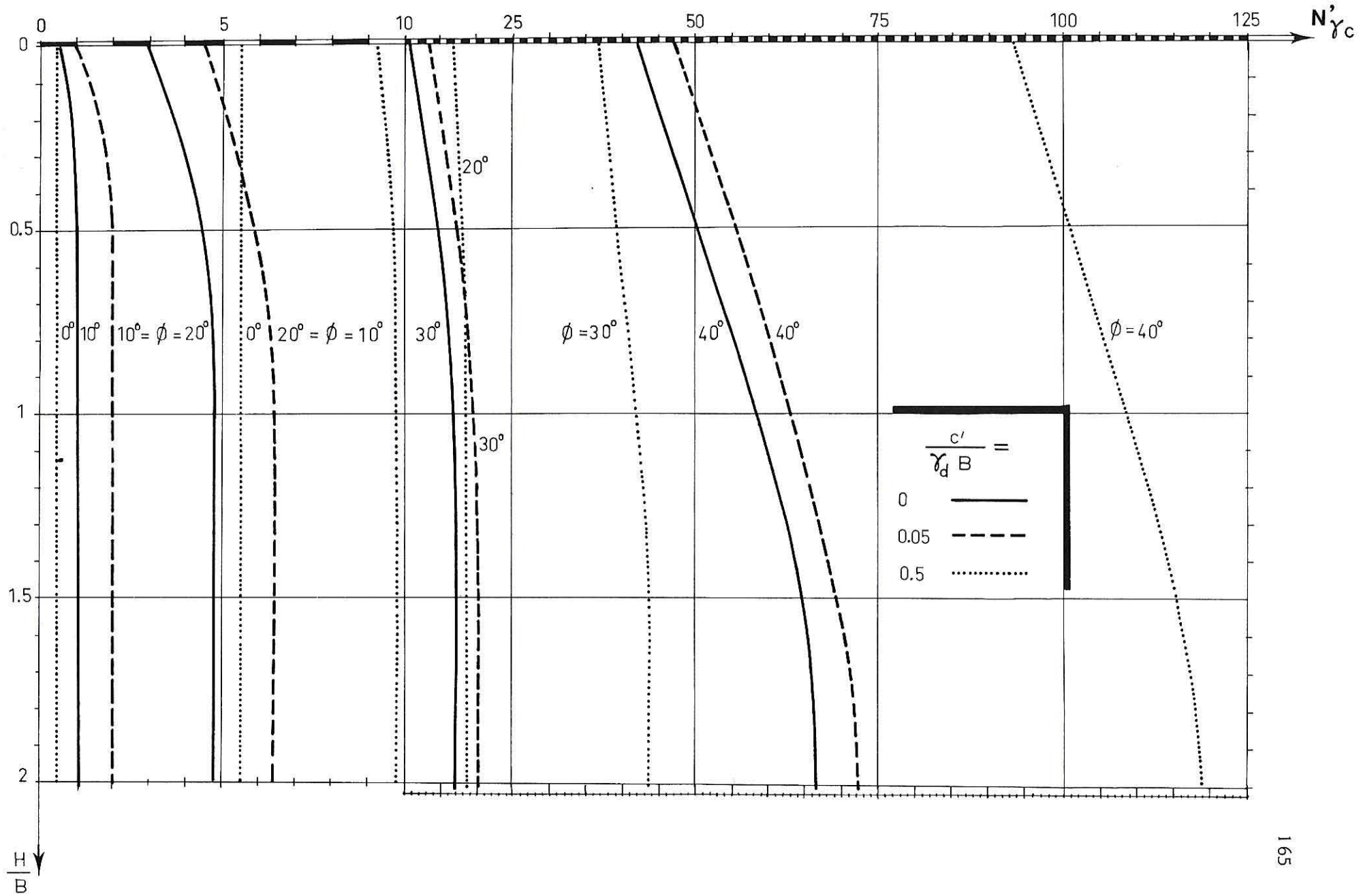
On peut donc dire que le rapport de la pression limite avec nappe sur la pression limite sans nappe vaut :

$$\frac{5,9}{7,2} = \frac{8,9}{10,8} = 82 \%$$

$$\frac{12\,400}{15\,100} = \frac{18\,800}{23\,000} = 82 \%$$

GRAPHIQUE

N'_{7c} p. 165



BIBLIOGRAPHIE

L'étude théorique de cette question ainsi que les résultats numériques sont dûs à Obin [1].

REFERENCE

- [1] J.P. OBIN, "Force portante en déformation plane d'un sol verticalement non homogène", Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Grenoble (Février 1972).

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE VERTICALE CENTRÉE**

(Semelle, Radier)
sur un sol homogène en pente

7-8

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

De part et d'autre de la fondation, le sol est limité supérieurement par un plan incliné (Fig. 1). (Notons que, sur la fig. 1d, ces deux plans sont confondus et que, sur la Fig. 1c, l'un des deux est horizontal.) On distingue les plans descendants à partir de la fondation (les deux plans des Fig. 1a et 1b et les plans de droite des Fig. 1c et 1d) et les plans montants (plan de gauche de la Fig. 1d). On appelle β l'angle maximal fait par un plan descendant avec l'horizontale.

Le sol est supposé homogène dans tout le domaine nécessaire au développement des lignes de glissement. Une limite maximale de ce domaine est donnée dans l'exemple 4.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation a une longueur infinie perpendiculairement aux lignes de plus grande pente. Sa base est horizontale, rigide, elle est située à la profondeur D et a une largeur constante B (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge verticale et centrée dont la valeur limite (à la rupture du sol) est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite, ou pression portante, est donnée par :

$$(1) \quad P_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

Remarques

1 - La pente peut être symétrique (Fig. 1a) ou non (Fig. 1b, 1c et 1d) : Ceci n'a pratiquement pas d'importance, pourvu que la charge soit bien verticale et centrée (notamment, dans le cas de la Fig. 1d, il faudrait que la charge exercée par la fondation sur le sol soit grande par rapport à la poussée des terres sur le côté amont de la fondation pour que l'inclinaison de la résultante soit négligeable).

2 - Si la fondation est située à une distance d du bord de la pente (Fig. 3) des abaques (Fig. 4 à 9) permettent de se ramener au cas où la pente commence au bord de la fondation (voir l'exemple 3).

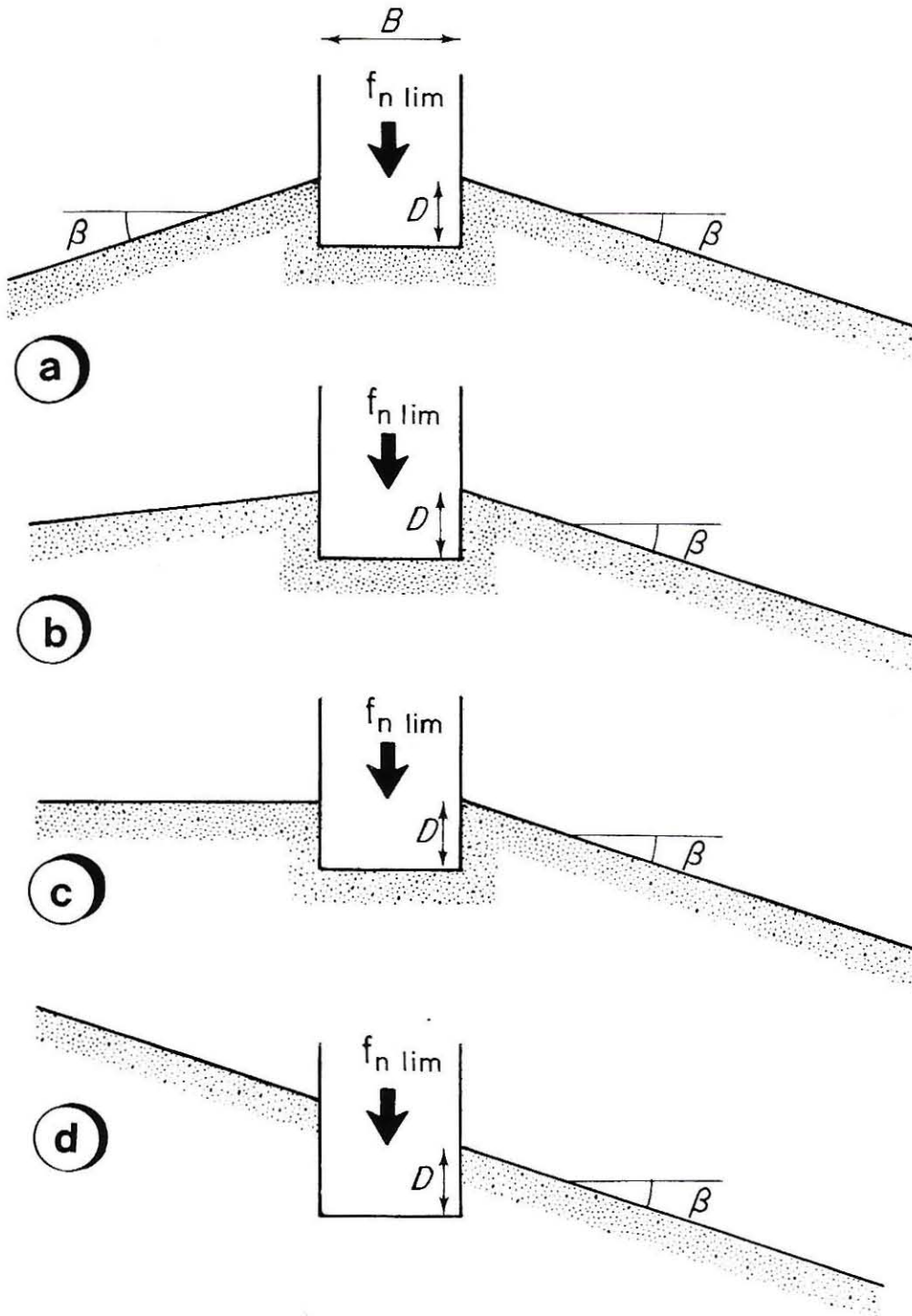


FIG. 1. — Définition de l'angle β , de la largeur B et de la profondeur D .

3 - Bien que les résultats donnés ici aient été établis pour une fondation de longueur infinie, on peut les utiliser sans modification pour une fondation rectangulaire à condition que la longueur L ($L > B$) soit perpendiculaire aux lignes de plus grande pente. Au contraire, si c'est la largeur B qui est perpendiculaire aux lignes de plus grande pente, il faudra faire deux calculs et ne retenir comme pression limite que le plus faible des deux résultats (voir l'exemple 5).

4 - On ne peut absolument pas utiliser les résultats donnés ici pour calculer la force portante d'une fondation rectangulaire reposant sur un remblai en forme de tronc de pyramide (stockage de minerais, terrils). La pression limite réelle serait bien plus faible que la valeur calculée à l'aide de la formule (2) établie pour des pentes dont la longueur, suivant les courbes de niveau, est théoriquement infinie.

7-8

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(2) \quad p_{\text{lim}} = cN_{c\beta} + \gamma D \cos \beta N_{q\beta} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma\beta}$$

(Nota : le terme " γD " dont la signification est précisée dans le paragraphe 2b de l'introduction vaut ici $\gamma D \cos \beta$)

avec :

c : cohésion du sol

ϕ : angle de frottement interne du sol

γ : poids volumique du sol

β : pente du terrain

D : profondeur de la base de la fondation

B : largeur de la fondation

$N_{\gamma\beta}$: coefficient sans dimensions dépendant de ϕ et β

$N_{c\beta}$ et $N_{q\beta}$: coefficients sans dimensions dépendant de ϕ , β et δ_0/β

avec :

$$(3) \quad \delta_0/\beta = \frac{1}{\beta} \text{Arctg} \frac{\sin \beta}{\cos \beta + \frac{c \cotg \phi}{\gamma D \cos \beta}}$$

(Nota : δ_0 est l'inclinaison fictive de la surcharge $\gamma D \cos \beta$ exercée par les terres sus-jacentes sur le plan passant par le bord de la fondation et parallèle à la pente.)

Une excellente approximation de cette expression est donnée par :

$$(4) \quad \frac{\delta_0}{\beta} = \frac{1}{1 + \frac{c \cotg \phi}{\gamma D \cos \beta}} .$$

Notons que :

- si $c = 0$ $\delta_0/\beta = 1$
- si $D = 0$ $\delta_0/\beta = 0$
- si $c = 0$ et $D = 0$, δ_0/β est indéterminé, ce qui n'est pas gênant car on n'utilise alors que $N_{\gamma\beta}$ qui n'en dépend pas
- si $\phi = 0$, δ_0/β est nul (ou indéterminé si $D = 0$) mais on ne l'utilise pas car on prend alors la formule suivante :

$$(5) \quad p_{lim} = \gamma D \cos^2 \beta + c N_{c\beta}^0$$

avec :

$N_{c\beta}^0$: coefficient sans dimensions dépendant de β et de $(\gamma D \cos \beta)/c$.

Les valeurs numériques des coefficients $N_{c\beta}^0$, $N_{c\beta}$, $N_{q\beta}$ et $N_{\gamma\beta}$ sont données sous forme de tables et de graphiques (*).

Remarquons enfin que la formule (2) ou (5) ne donne que la stabilité de la fondation. Il convient de vérifier en outre la stabilité d'ensemble de la pente (*avec* et *sans* fondation) à l'aide des méthodes classiques (cercles de glissement...).

(*) Certaines courbes de $N_{c\beta}$ et $N_{q\beta}$ sont limitées par la courbe en tirets d'équation $\delta_0 = \phi$. Il est impossible en effet d'avoir $\delta_0 > \phi$ car alors la tranche supérieure de sol d'épaisseur D serait instable. De même les courbes de $N_{\gamma\beta}$ sont limitées par la courbe en tirets d'équation $\beta = \phi$ et certaines courbes de $N_{c\beta}^0$ par la courbe en tirets d'équation $\gamma D \cos \beta \sin \beta = c$. Mais d'autres courbes de $N_{c\beta}$, de $N_{q\beta}$ et $N_{c\beta}^0$ sont limitées par une autre condition plus restrictive (courbe en trait mixte). La signification de cette seconde limite est très délicate et nous renvoyons le lecteur à la référence [3] citée dans la bibliographie à la fin de cette section.

Exemple 1 : Cas : $\phi \neq 0$, $c \neq 0$, $D \neq 0$ et $d = 0$.

Quelle pression limite maximale peut supporter la fondation définie sur la Fig. 2 ?

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \gamma D \cos \beta &= 1\,800 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 1,5 \times 0,819 = 0,22 \text{ bar} \\ &= 112 \times 5 \times 0,819 = 460 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

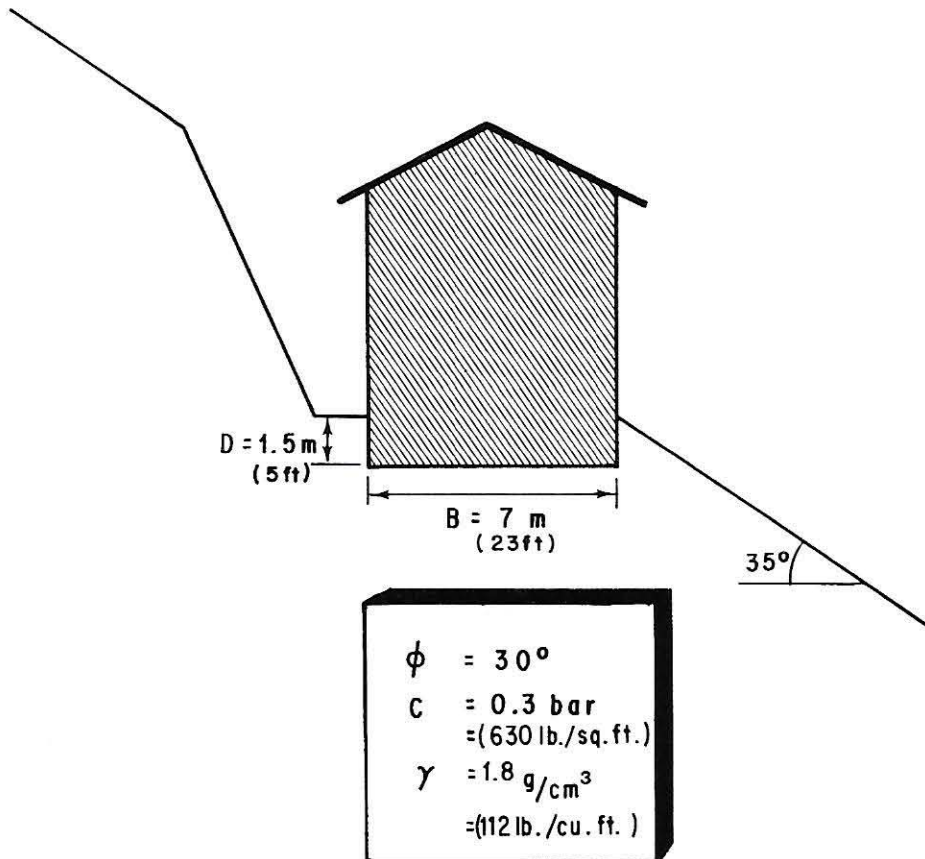


FIG. 2. — Fondation de l'exemple 1. La longueur L de cette fondation est perpendiculaire au plan de la figure.

On en tire, à l'aide de (4) :

$$\delta_0/\beta = 0,3.$$

On lit ensuite dans les tables pour $\delta_0/\beta = 0,3$, $\phi = 30^\circ$ et $\beta = 35^\circ$:-

$$N_{c\beta} = 12,12 \quad \text{et} \quad N_{q\beta} = 6,55.$$

Par ailleurs, $N_{\gamma\beta} = 0$ car $\beta > \phi$.

La pression limite se calcule alors par la formule (2) :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 0,3 \times 12,12 + 0,22 \times 6,35 \\ &= 3,64 + 1,45 = 5,09 \text{ bars} \\ &= 630 \times 12,12 + 460 \times 6,55 \\ &= 7\,640 + 3\,010 = 10\,650 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Soit, avec un coefficient de sécurité de 3 :

$$p_{adm} = p_{lim}/3 = 1,7 \text{ bar (3\,550 lb/sq. ft.)}$$

Si la même fondation avait été sur un sol horizontal ($\beta = 0$), on aurait obtenu :

$$p_{adm} = 8,4 \text{ bars (17\,500 lb/sq. ft.)}$$

Exemple 2 : Cas ; $\phi = 0$, $c \neq 0$, $D = 0$, $d = 0$

Considérons une fouille creusée dans une argile saturée dont la cohésion mesurée dans un essai non drainé vaut $c_u = 0,5$ bar (1 050 lb/sq. ft). Un dépôt de matériel doit être établi au bord de la fouille : quelle pression limite peut-il exercer sur le sol sachant que les berges de la fouille sont inclinées de 65° sur l'horizontale ?

La pression limite se calcule avec la formule (5) puisque $\phi = 0$. On voit dans la table de $N_{c\beta}^0$ que pour $\beta = 65^\circ$ et $D = 0$, on a :

$$N_{c\beta}^0 = 2,87.$$

D'où :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 2,87 \times 0,5 = 1,43 \text{ bar} \\ &= 2,87 \times 1\,050 = 3\,000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Exemple 3 : Cas : $\phi \neq 0$, $c \neq 0$, $D \neq 0$, $d \neq 0$

Quelle est la pression limite pour une fondation identique à celle de l'exemple 1 mais située à 8 m (26 ft) du bord de la pente ? (Voir Fig. 3.)

Pour cela, nous allons déterminer la pente équivalente β' qui est la pente issue du bord de la fondation qui fournit la même pression limite que la pente réelle. On utilise l'abaque de la Fig. 7 selon le mode d'emploi indiqué sur la Fig. 3 : on trouve $\beta' = 25^\circ$

On applique alors la formule (4) qui donne :

$$\delta_0/\beta' = 0,32.$$

On interpole alors entre les tables relatives à $\delta_0/\beta = 0,3$ et $0,4$ pour $\phi = 30^\circ$ et $\beta = 25^\circ$.

On obtient :

$$N_{c\beta} = 15,8 \quad N_{q\beta} = 9,2 \quad \text{et} \quad N_{\gamma\beta} = 4,8.$$

D'autre part :

$$\begin{aligned} \gamma D \cos \beta' &= 1\,800 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 1,5 \times 0,906 = 0,24 \text{ bar} \\ &= 112 \times 5 \times 0,906 = 510 \text{ lb/sq. ft} \end{aligned}$$

et :

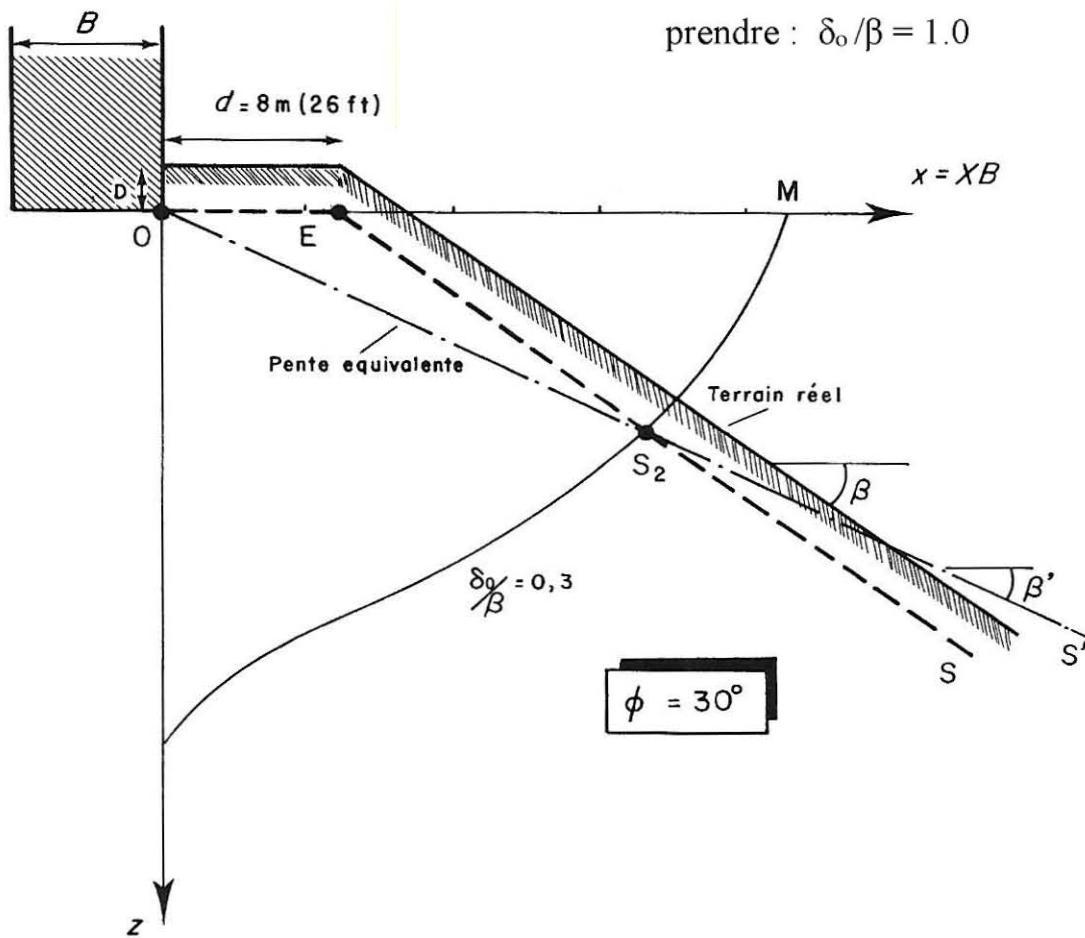
$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= 0,5 \times 1\,800 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 7 = 0,62 \text{ bar} \\ &= 0,5 \times 112 \times 23 = 1\,290 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

La formule (2) donne alors :

$$\begin{aligned} P_{lim} &= 0,3 \times 15,8 + 0,24 \times 9,2 + 0,62 \times 4,8 \\ &= 4,75 + 2,20 + 2,98 = 9,93 \text{ bars} \\ &= 630 \times 15,8 + 510 \times 9,2 + 1\,290 \times 4,8 \\ &= 10\,000 + 4\,700 + 6\,200 = 20\,900 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

En comparant avec le résultat de l'exemple 1, on voit que l'on a doublé la valeur de la pression limite en éloignant la fondation de la pente.

Si $c = 0$ et $D = 0$
 prendre : $\delta_0/\beta = 1.0$



7-8

FIG. 3. — Mode d'utilisation des abaques des Fig. 4 à 9.
 La ligne brisée OES est parallèle à la surface du sol à une distance verticale D . Elle rencontre en S_2 la courbe relative au δ_0/β de l'exemple traité. La pente équivalente β' est l'angle de OS_2 avec l'horizontale.

$$\phi = 0^\circ$$

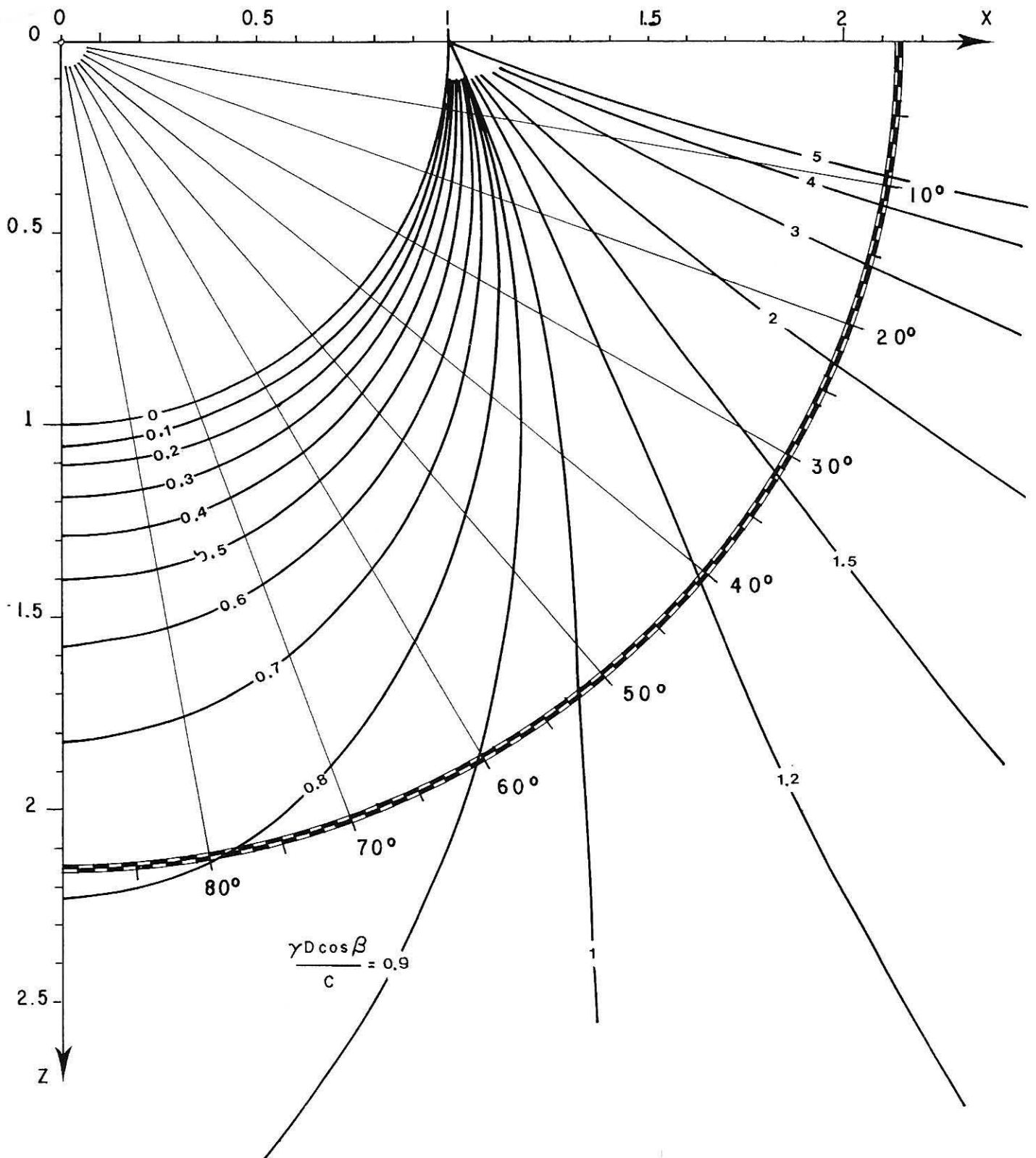


FIG. 4. — Abaque donnant la pente équivalente pour $\phi = 0^\circ$.
Voir le mode d'emploi sur la Fig. 3.

$$\phi = 10^\circ$$

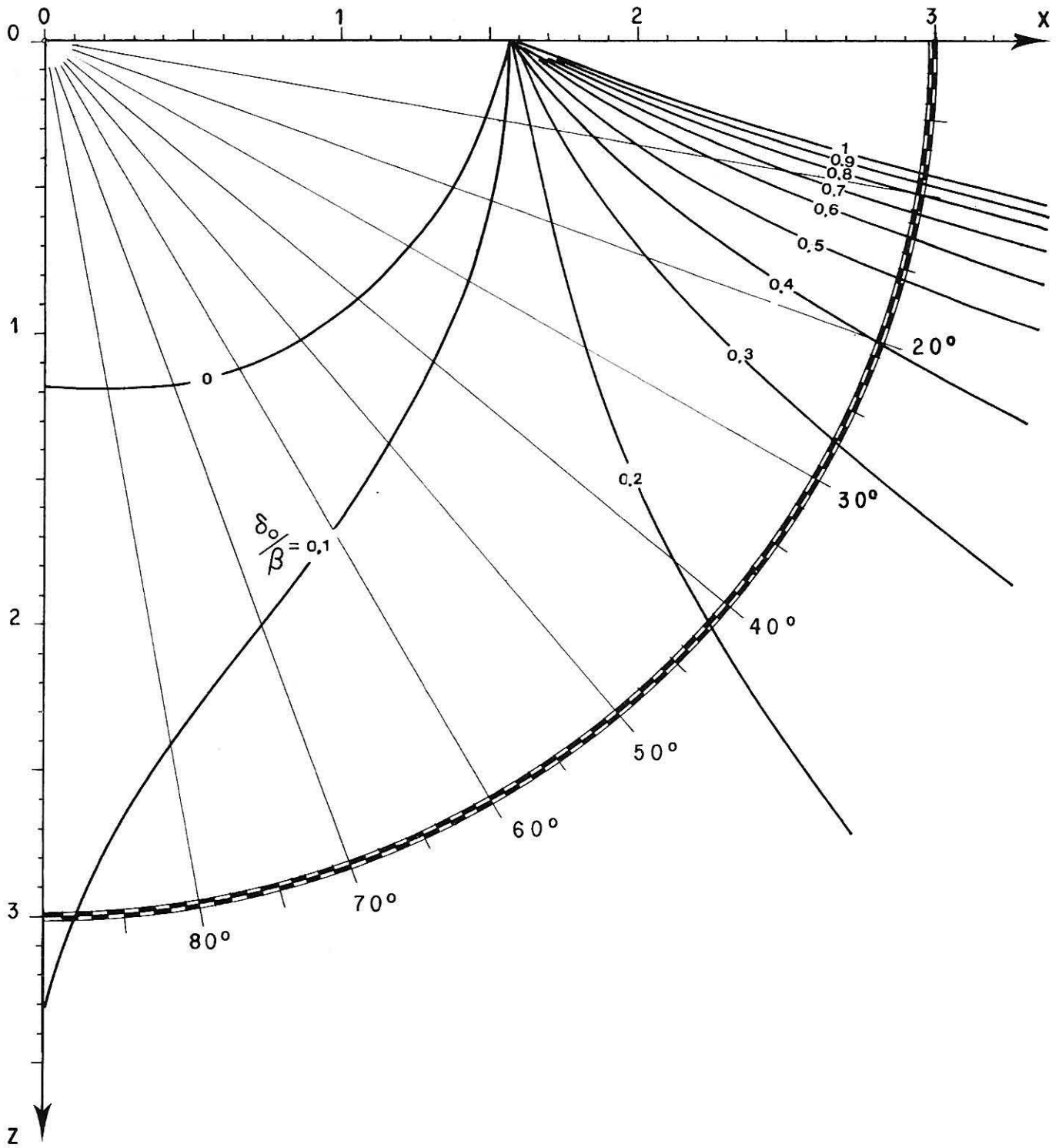


FIG. 5. — Abaque donnant la pente équivalente pour $\phi = 10^\circ$.
Voir le mode d'emploi sur la Fig. 3.

$$\phi = 20^\circ$$

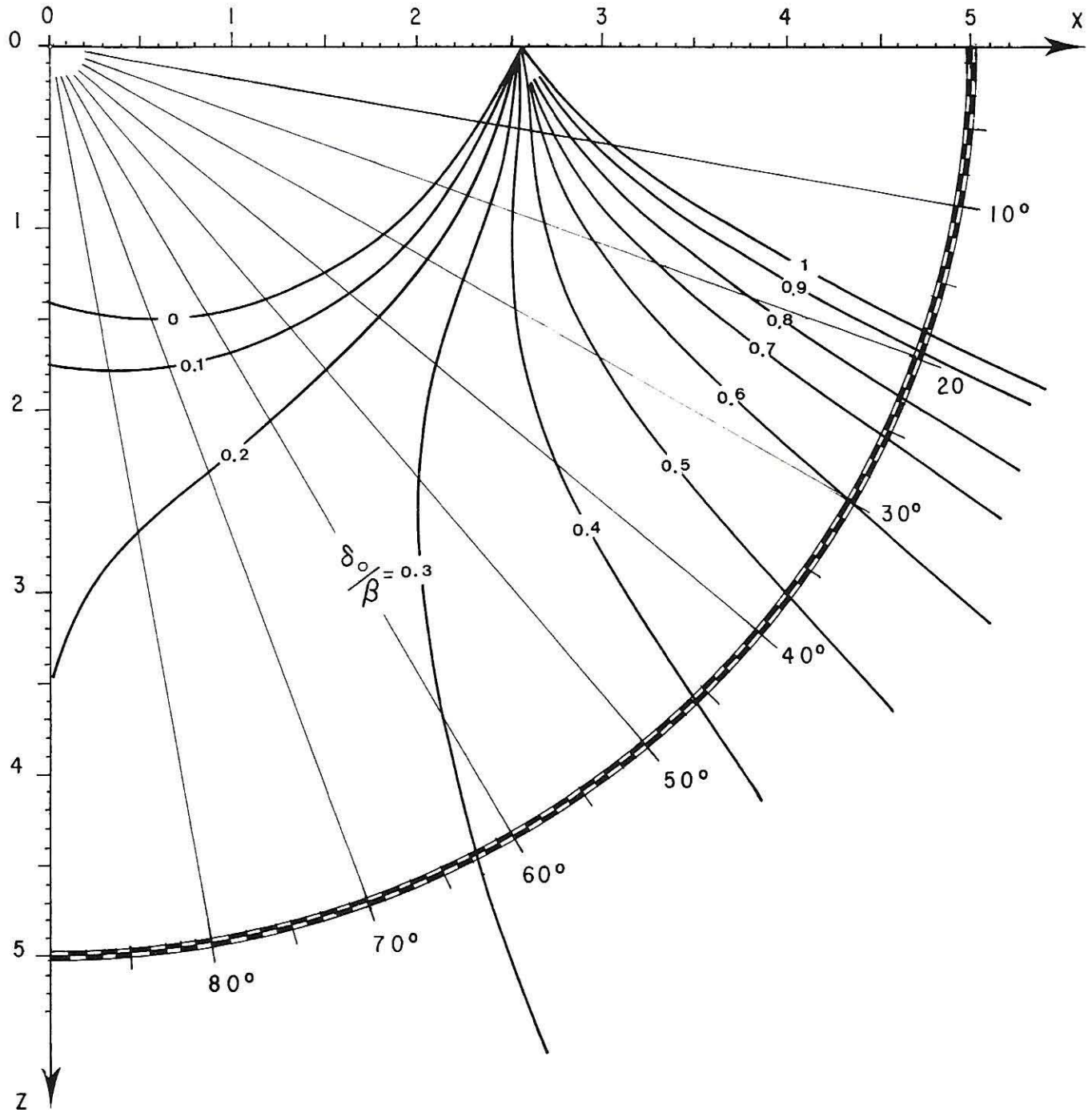


FIG. 6. — Abaque donnant la pente équivalente pour $\phi = 20^\circ$.
Voir le mode d'emploi sur la Fig. 3.

$$\phi = 30^\circ$$

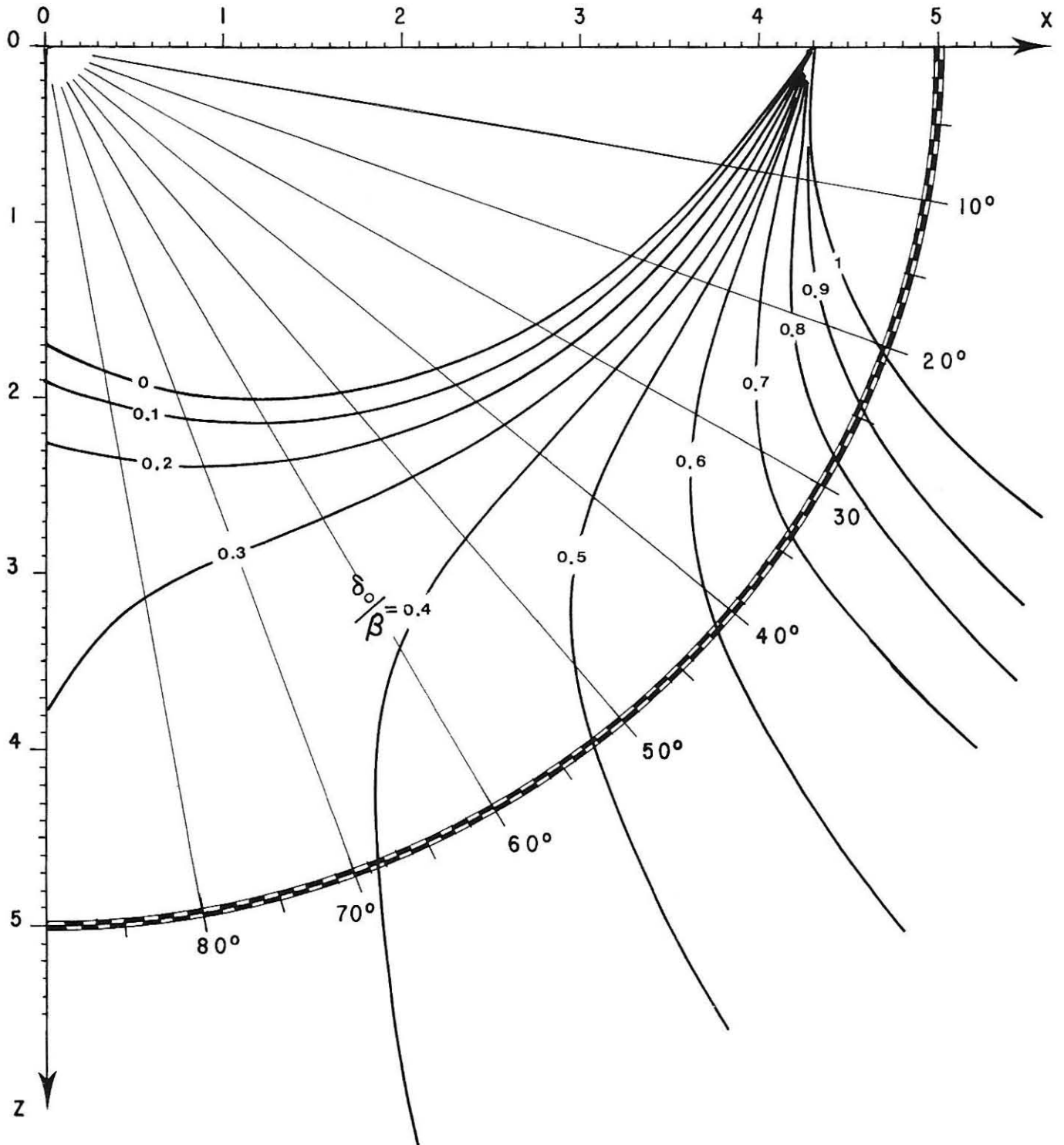


FIG. 7. — Abaque donnant la pente équivalente pour $\phi = 30^\circ$.
Voir le mode d'emploi sur la Fig. 3.

$$\phi = 40^\circ$$

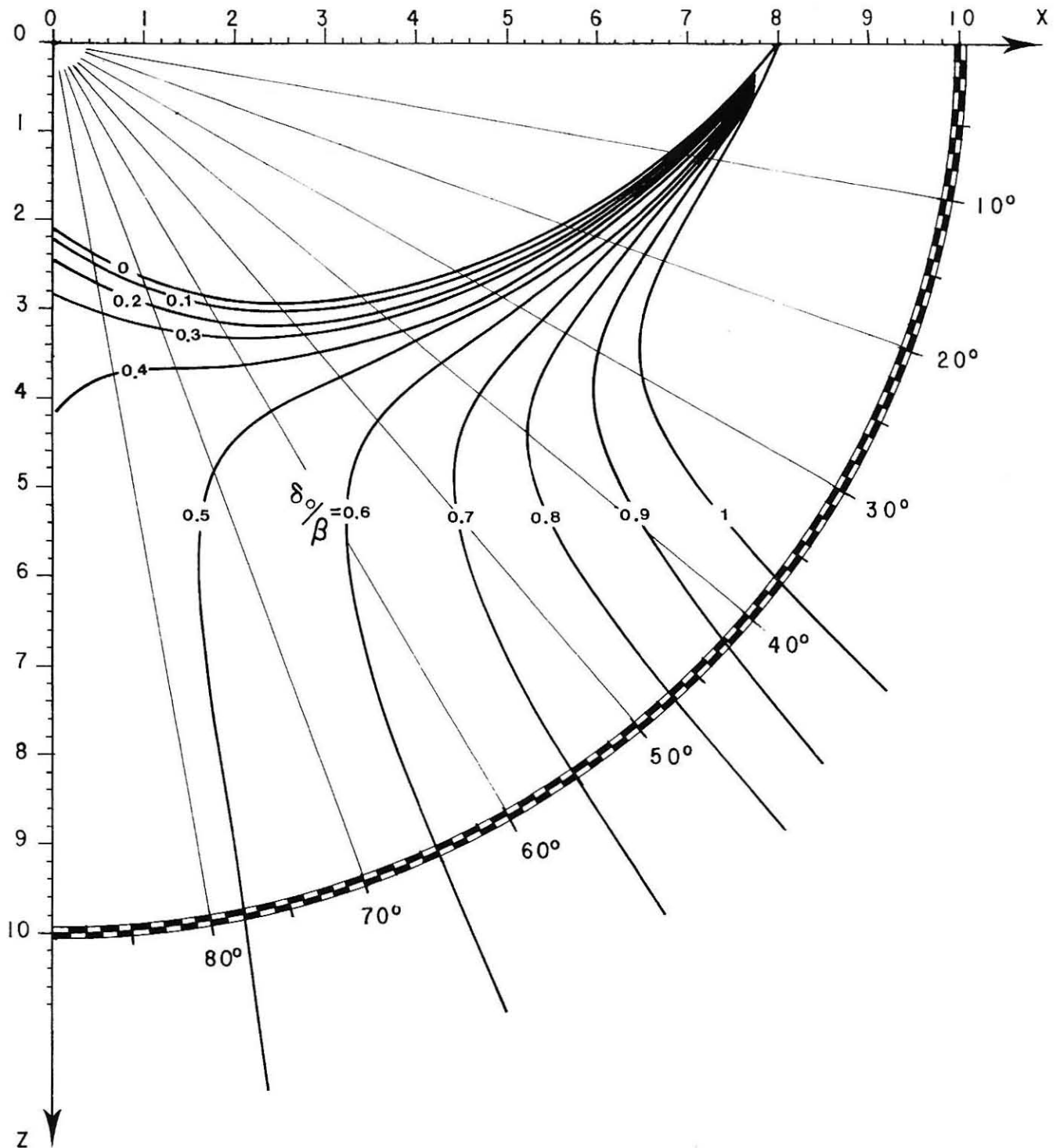
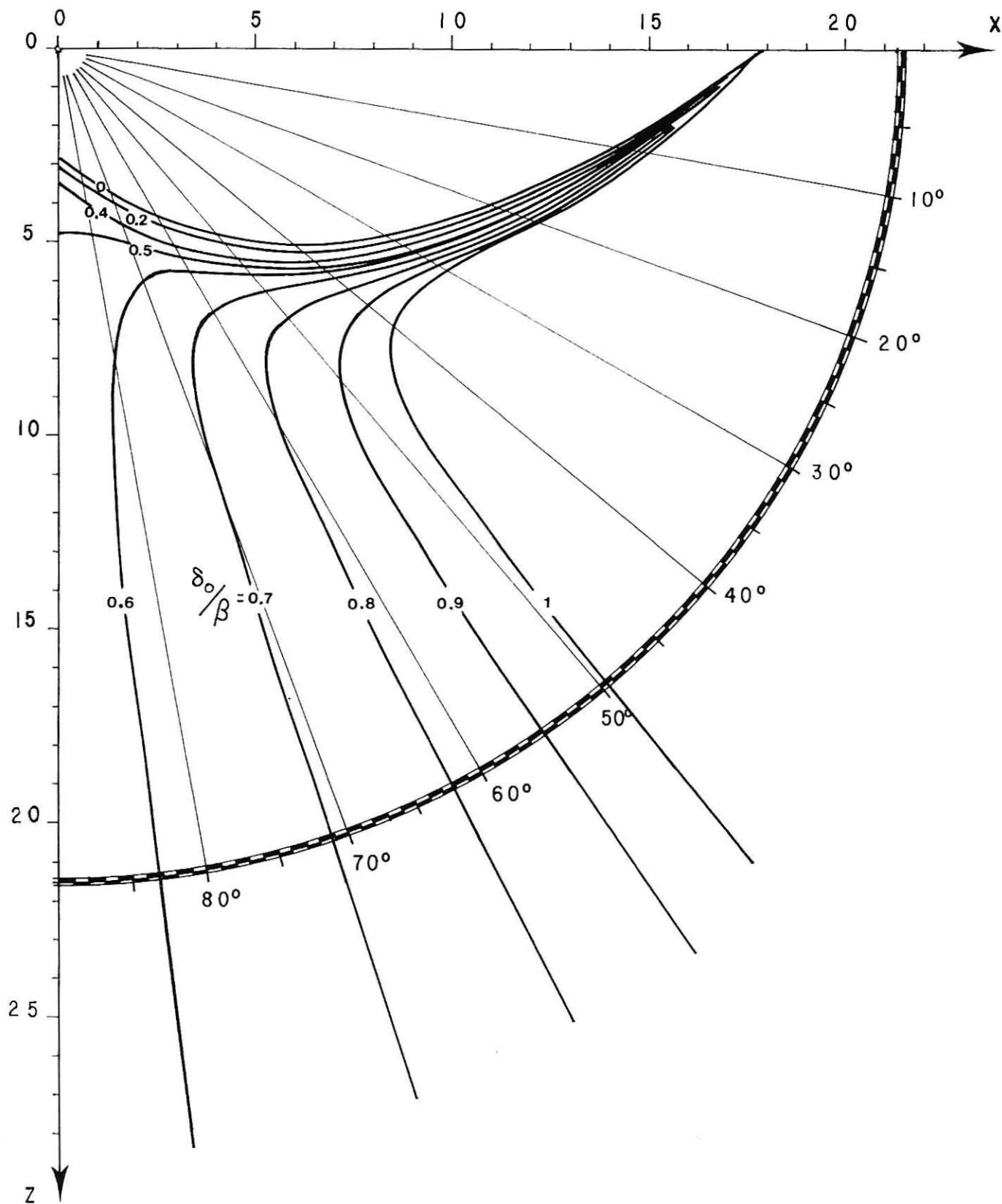


FIG. 8. — Abaque donnant la pente équivalente pour $\phi = 40^\circ$.
Voir le mode d'emploi sur la Fig. 3.

$$\phi = 50^\circ$$



7-8

FIG. 9. — Abaque donnant la pente équivalente pour $\phi = 50^\circ$.
Voir le mode d'emploi sur la Fig. 3.

Exemple 4 : Sol hétérogène.

Reprenons l'exemple 1 et déterminons dans quelle région le sol doit être homogène pour que la pression limite obtenue à l'aide de la formule (2) soit valable.

La limite de cette région est donnée, avec une approximation dans le sens de la sécurité, par la courbe $O' S_1 L_2 S_2$ de la Fig. 11 tracée à l'aide des indications portées sur la Fig. 10. Cependant, cette limite n'est valable que si la résistance mécanique du sol est plus grande à l'extérieur de la région qu'à l'intérieur. Dans le cas contraire, on ne peut rien dire.

Le seul calcul à faire est celui de l'angle ϵ . Pour cela, déterminons d'abord δ_0 . Or, on sait, d'après l'exemple 1, que $\delta_0 = 0,3 \beta$. Donc $\delta_0 = 10,5^\circ$. D'où :

$$\Gamma_0 = \text{Arc sin} \left(\frac{\sin \delta_0}{\sin \phi} \right) = 21^\circ.$$

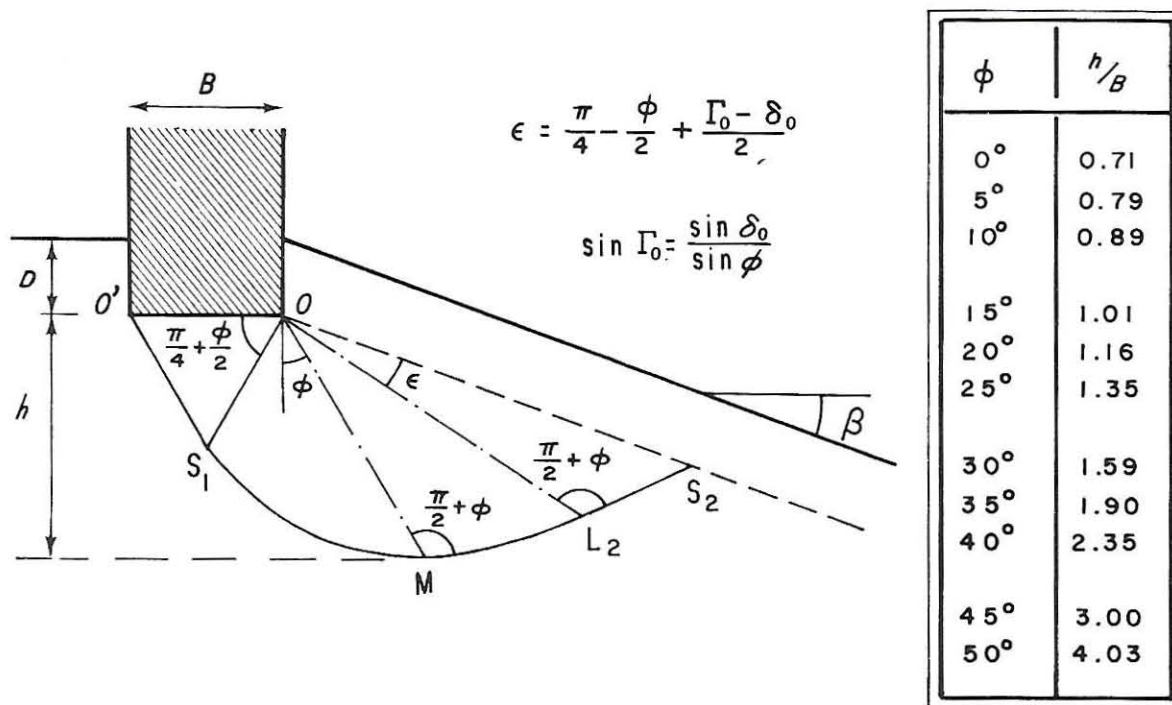
On en déduit :

$$\epsilon = 45^\circ - 15^\circ + \frac{21^\circ - 10,5^\circ}{2} = 35^\circ.$$

La courbe $O' S_1 L_2 S_2$ se construit alors aisément. A titre de contrôle, on peut calculer la cote du point à tangente horizontale M d'après la table de la Fig. 10 :

$$\begin{aligned} h &= 1,59 \times B = 1,59 \times 7 = 11,1 \text{ m} \\ &= 1,59 \times 23 = 36,5 \text{ ft.} \end{aligned}$$

On peut également contrôler la longueur OS_2 sur l'abaque de la Fig. 7, S_2 étant l'intersection d'un rayon issu de O et incliné de 35° avec la courbe relative à $\delta_0/\beta = 0,3$.



7-8

FIG. 10. — Tracé de la courbe $O' S_1 L_2 S_2$ qui limite la zone où le sol doit être homogène. $O' S_1$ est une droite. De S_1 à L_2 on mène une spirale logarithmique faisant avec le rayon vecteur un angle de $\pi/2 + \phi$. Le rayon OL_2 est défini à partir de OS_2 par l'angle ϵ . Enfin, $L_2 S_2$ est une droite. On peut vérifier la longueur OS_2 ainsi obtenue à l'aide des Fig. 4 à 9. Le tableau donne la profondeur de M. Toutefois si la pente est forte, le point S_2 peut se trouver plus bas que M. Rappelons que δ_0 est donné par la formule (4). Notons enfin que lorsque $\phi = 0$ la spirale est un cercle.

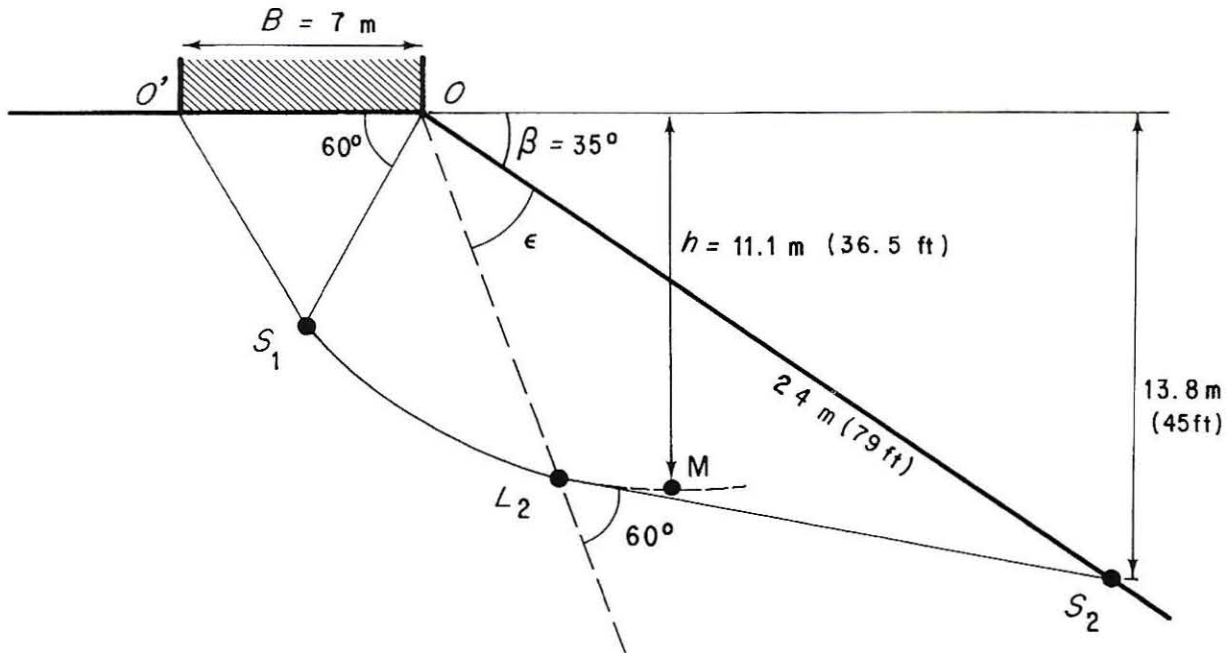


FIG. 11. - Construction de la limite du réseau de caractéristiques pour l'exemple 4.

Exemple 5 : Problème tridimensionnel (Fondation de longueur finie).

Considérons le bâtiment représenté sur la Fig. 12. Supposons qu'il repose sur un radier uniformément chargé de longueur $L = 12 \text{ m}$ (40 ft), de largeur $B = 6 \text{ m}$ (20 ft) et dont la base se trouve à $0,9 \text{ m}$ (3 ft) de profondeur. Les propriétés du sol sont définies par $c = 0$, $\phi = 25^\circ$, $\gamma = 1,7 \text{ g/cm}^3$ (106 lb/cu. ft) et la pente est $\beta = 15^\circ$. Quelle pression limite peut exercer ce radier sur le sol ?

- Premier calcul :

Calculons d'abord la pression limite sur sol horizontal (stabilité transversale de la fondation).

D'après les tables pour $\delta_0/\beta = 1$ (puisque $c = 0$), $\beta = 0$ (sol horizontal) et $\phi = 25^\circ$, on a :

$$N_q = N_{q\beta} = 10,66 \quad \text{et} \quad N_\gamma = N_{\gamma\beta} = 8,11.$$

Par ailleurs :

$$\begin{aligned} \gamma D &= 1\,700 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 0,9 = 0,15 \text{ bar} \\ &= 106 \times 3 = 320 \text{ lb/sq. ft} \end{aligned}$$

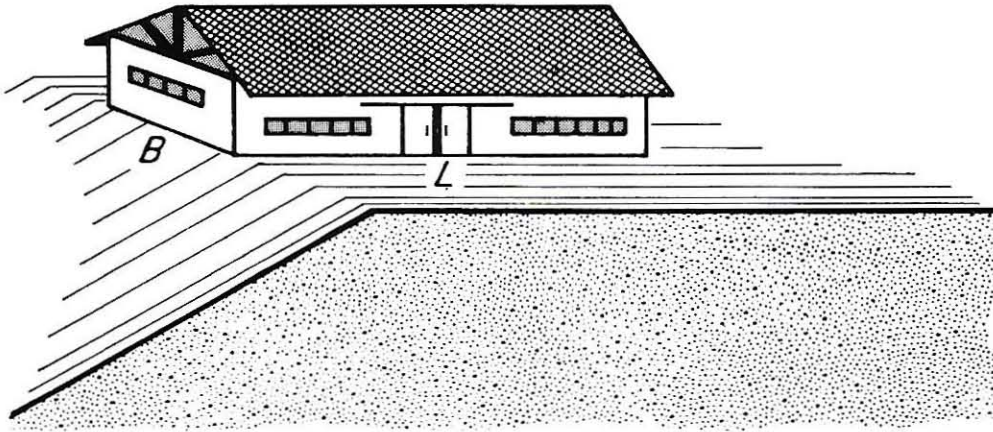


FIG. 12. — Fondation de l'exemple 5.

et :

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \gamma B &= \frac{1}{2} \times 1\,700 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 6 = 0,50 \text{ bar} \\ &= \frac{1}{2} \times 106 \times 20 = 1\,060 \text{ lb/sq. ft.}\end{aligned}$$

On peut alors calculer la pression limite à l'aide de la formule (2) :

$$\begin{aligned}P_{\text{lim}} &= 0,15 \times 10,66 + 0,50 \times 8,11 \\ &= 1,60 + 4,05 = 5,65 \text{ bars} \\ &= 320 \times 10,66 + 1\,060 \times 8,11 \\ &= 3\,400 + 8\,600 = 12\,000 \text{ lb/sq. ft.}\end{aligned}$$

- Deuxième calcul :

Calculons la pression limite avec L pour "largeur" de la fondation, le sol étant incliné de $\beta = 15^\circ$.

On lit dans les tables pour $\delta_0/\beta = 1$ (puisque $c = 0$), $\beta = 15^\circ$ et $\phi = 25^\circ$:

$$N_{q\beta} = 6,34 \quad \text{et} \quad N_{\gamma\beta} = 4,1.$$

Par ailleurs :

$$\begin{aligned}\gamma D \cos \beta &= 1\,700 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 0,9 \times 0,966 = 0,145 \text{ bar} \\ &= 106 \times 3 \times 0,966 = 307 \text{ lb/sq. ft} \\ \frac{1}{2} \gamma L &= \frac{1}{2} \times 1\,700 \times 9,81 \times 10^{-5} \times 12 = 1,0 \text{ bar} \\ &= \frac{1}{2} \times 106 \times 40 = 2\,100 \text{ lb/sq. ft.}\end{aligned}$$

On peut alors calculer la pression limite à l'aide de la formule (2) :

$$\begin{aligned} p_{\text{lim}} &= 0,145 \times 6,34 + 1,0 \times 4,1 \\ &= 0,92 + 4,1 = 5,02 \text{ bars} \\ &= 307 \times 6,34 + 2\,100 \times 4,1 \\ &= 1\,940 + 8\,600 = 10\,540 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

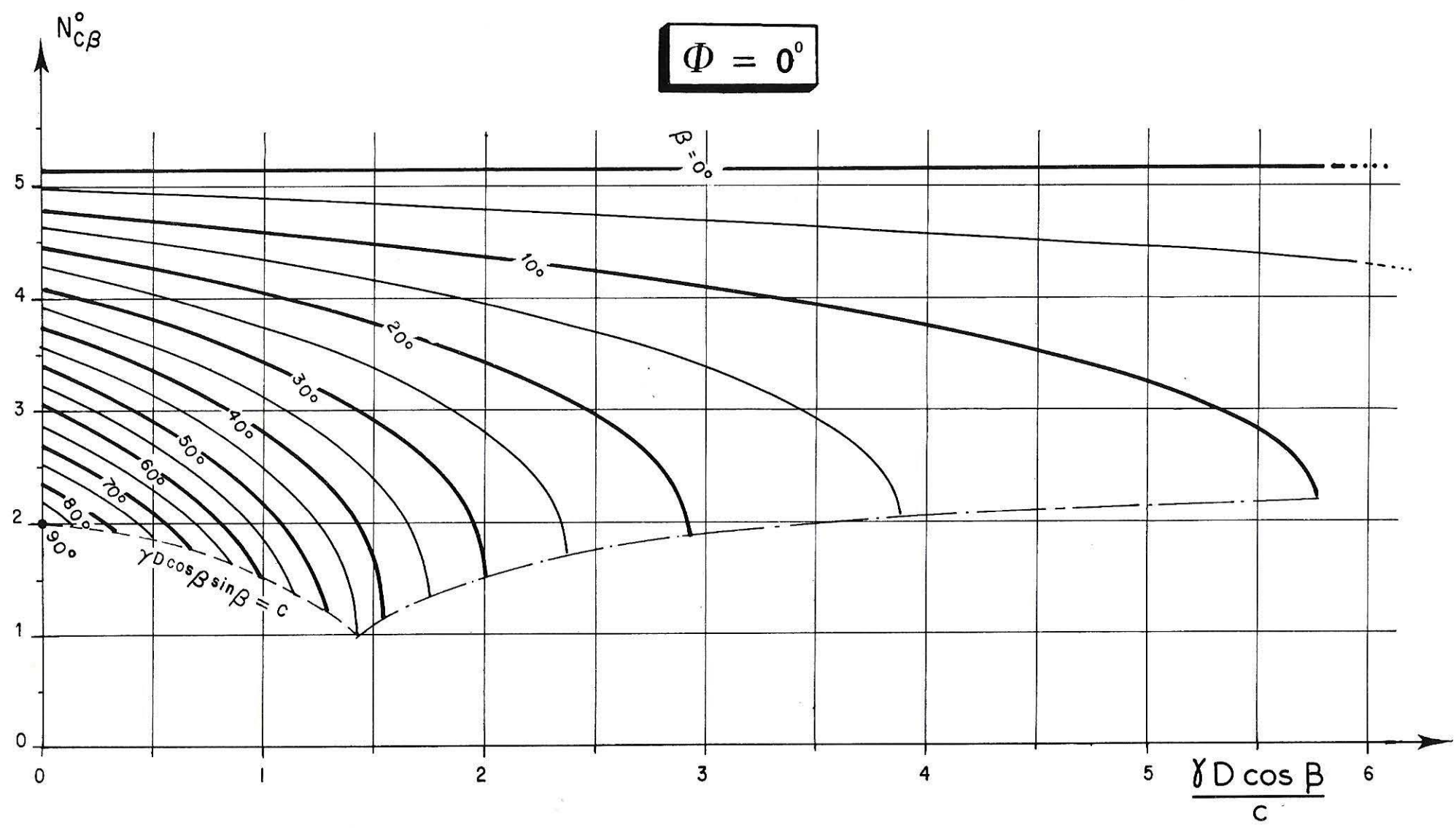
Des deux valeurs de la pression limite, on retient cette dernière qui est la plus faible :

$$\begin{aligned} p_{\text{lim}} &= 5,02 \text{ bars} \\ &= 10\,540 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

TABLES ET GRAPHIQUES

$N_{c\beta}^0$	p. 188-189
$N_{c\beta}$	p. 190-211
$N_{q\beta}$	p. 212-233
$N_{\gamma\beta}$	p. 234-235

$\Phi = 0^\circ$



N^o C_β

$\frac{\gamma D \cos \beta}{C}$		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
β	0°	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14
	5°	4.97	4.96	4.95	4.94	4.93	4.92	4.91	4.90	4.89	4.89	4.88	4.87	4.86	4.85	4.84	4.83	4.82	4.81	4.80	4.79
	10°	4.79	4.78	4.76	4.74	4.72	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.60	4.58	4.56	4.54	4.52	4.49	4.47	4.45	4.42	4.40
	15°	4.62	4.59	4.56	4.54	4.51	4.48	4.45	4.42	4.39	4.36	4.32	4.29	4.25	4.22	4.18	4.14	4.10	4.06	4.02	3.97
	20°	4.44	4.41	4.37	4.34	4.30	4.26	4.22	4.17	4.13	4.08	4.03	3.98	3.93	3.88	3.82	3.76	3.70	3.64	3.57	3.50
	25°	4.27	4.23	4.18	4.13	4.08	4.03	3.98	3.92	3.87	3.80	3.74	3.67	3.60	3.52	3.44	3.36	3.26	3.16	3.05	2.93
	30°	4.09	4.04	3.99	3.93	3.87	3.81	3.74	3.67	3.60	3.52	3.44	3.35	3.25	3.15	3.03	2.91	2.77	2.61	2.41	2.15
	35°	3.92	3.86	3.80	3.73	3.66	3.59	3.51	3.42	3.33	3.23	3.13	3.01	2.89	2.74	2.58	2.39	2.15	1.79		
	40°	3.75	3.68	3.61	3.53	3.45	3.37	3.27	3.17	3.06	2.94	2.81	2.67	2.50	2.31	2.06	1.71				
	45°	3.57	3.50	3.42	3.33	3.24	3.14	3.04	2.92	2.79	2.65	2.49	2.31	2.09	1.80	1.28					
	50°	3.40	3.32	3.23	3.14	3.04	2.93	2.81	2.67	2.53	2.36	2.17	1.93	1.62							
	55°	3.22	3.14	3.04	2.94	2.83	2.71	2.58	2.43	2.26	2.07	1.84	1.53								
	60°	3.05	2.96	2.86	2.75	2.63	2.50	2.36	2.19	2.00	1.78	1.50									
	65°	2.87	2.78	2.67	2.56	2.43	2.29	2.14	1.96	1.75											
	70°	2.70	2.60	2.49	2.37	2.24	2.09	1.93													
	75°	2.52	2.42	2.31	2.19	2.05	1.90														
	80°	2.35	2.25	2.13	2.00																
	85°	2.17	2.07																		
	90°	2.00																			

7-8

$\frac{\gamma D \cos \beta}{C}$		2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	
β	0°	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	
	5°	4.78	4.77	4.76	4.74	4.73	4.72	4.71	4.70	4.69	4.68	4.67	4.66	4.64	4.63	4.62	4.61	4.60	4.59	4.57	4.56	
	10°	4.38	4.35	4.32	4.30	4.27	4.24	4.22	4.19	4.16	4.13	4.10	4.07	4.03	4.00	3.97	3.93	3.90	3.86	3.82	3.78	
	15°	3.93	3.88	3.83	3.78	3.73	3.68	3.62	3.56	3.50	3.43	3.36	3.28	3.20	3.11	3.02	2.91	2.78	2.63	2.41		
	20°	3.42	3.34	3.25	3.16	3.05	2.94	2.81	2.65	2.45	2.13											
	25°	2.80	2.64	2.44	2.17																	
	30°	1.52																				

$\frac{\gamma D \cos \beta}{C}$		4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
β	0°	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14
	5°	4.55	4.54	4.52	4.51	4.50	4.48	4.47	4.46	4.44	4.43	4.42	4.40	4.39	4.37	4.36	4.34	4.33	4.32	4.30	4.28
	10°	3.74	3.70	3.66	3.61	3.57	3.52	3.47	3.42	3.36	3.30	3.24	3.17	3.10	3.01	2.92	2.82	2.69	2.51		

$\frac{\gamma D \cos \beta}{C}$		6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9
β	0°	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14
	5°	4.27	4.25	4.24	4.22	4.21	4.19	4.17	4.16	4.14	4.12	4.10	4.09	4.07	4.05	4.03	4.01	3.99	3.97	3.95	3.93

$\frac{\gamma D \cos \beta}{C}$		8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9
β	0°	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14
	5°	3.91	3.89	3.87	3.85	3.83	3.80	3.78	3.76	3.73	3.71	3.69	3.66	3.63	3.61	3.58	3.55	3.52	3.49	3.46	3.43

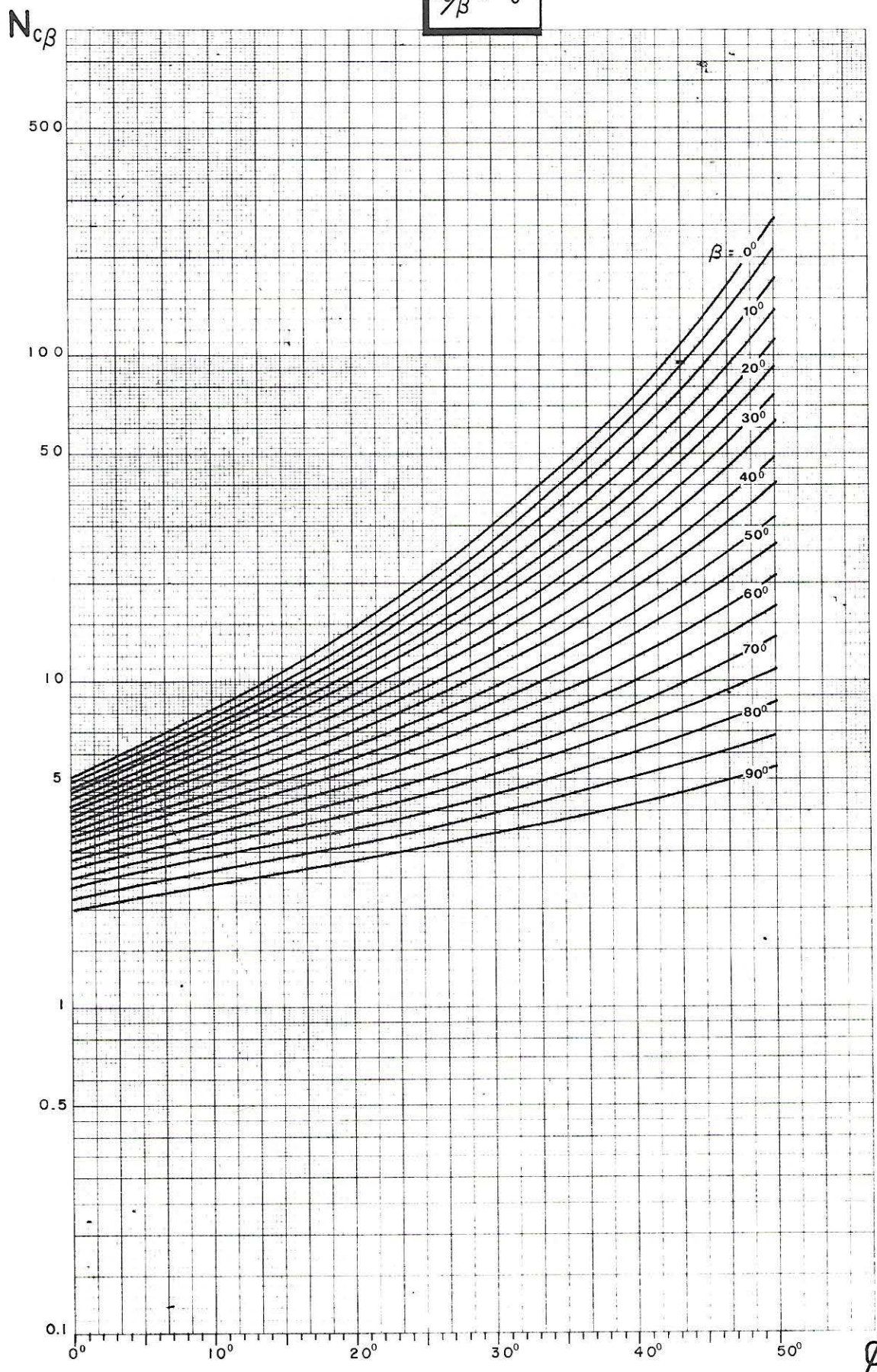
$\frac{\gamma D \cos \beta}{C}$		10	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	12	20	100	∞
β	0°	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14
	5°	3.40	3.37	3.33	3.29	3.25	3.21	3.17	3.13	3.08	3.03	2.97	2.91	2.83	2.74	2.62					

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	216.6	112.3	64.89	40.65	27.08	18.93	13.75	10.30	7.92	6.22
10°	175.6	94.13	55.89	35.81	24.32	17.29	12.74	9.66	7.51	5.95
15°	142.6	78.90	48.11	31.53	21.82	15.77	11.78	9.05	7.11	5.69
20°	115.7	66.10	41.40	27.74	19.57	14.37	10.89	8.47	6.72	5.43
25°	93.79	55.35	35.59	24.38	17.53	13.08	10.05	7.91	6.35	5.17
30°	76.02	46.33	30.58	21.41	15.68	11.89	9.26	7.38	5.98	4.92
35°	61.58	38.75	26.25	18.79	14.01	10.79	8.52	6.87	5.63	4.67
40°	49.86	32.38	22.51	16.46	12.50	9.78	7.83	6.39	5.29	4.43
45°	40.34	27.04	19.29	14.40	11.14	8.85	7.18	5.92	4.95	4.19
50°	32.61	22.55	16.50	12.58	9.90	7.99	6.57	5.48	4.63	3.95
55°	26.33	18.78	14.09	10.97	8.79	7.20	5.99	5.06	4.32	3.72
60°	21.22	15.61	12.00	9.54	7.78	6.47	5.46	4.66	4.02	3.49
65°	17.08	12.95	10.21	8.28	6.87	5.79	4.95	4.28	3.72	3.26
70°	13.72	10.72	8.65	7.16	6.04	5.17	4.48	3.91	3.44	3.04
75°	10.98	8.84	7.31	6.17	5.30	4.60	4.03	3.56	3.16	2.82
80°	8.76	7.26	6.15	5.30	4.62	4.07	3.62	3.23	2.89	2.60
85°	6.96	5.94	5.15	4.53	4.01	3.59	3.22	2.91	2.64	2.39
90°	5.49	4.83	4.29	3.84	3.46	3.14	2.86	2.61	2.38	2.18

$\delta/\beta = 0$

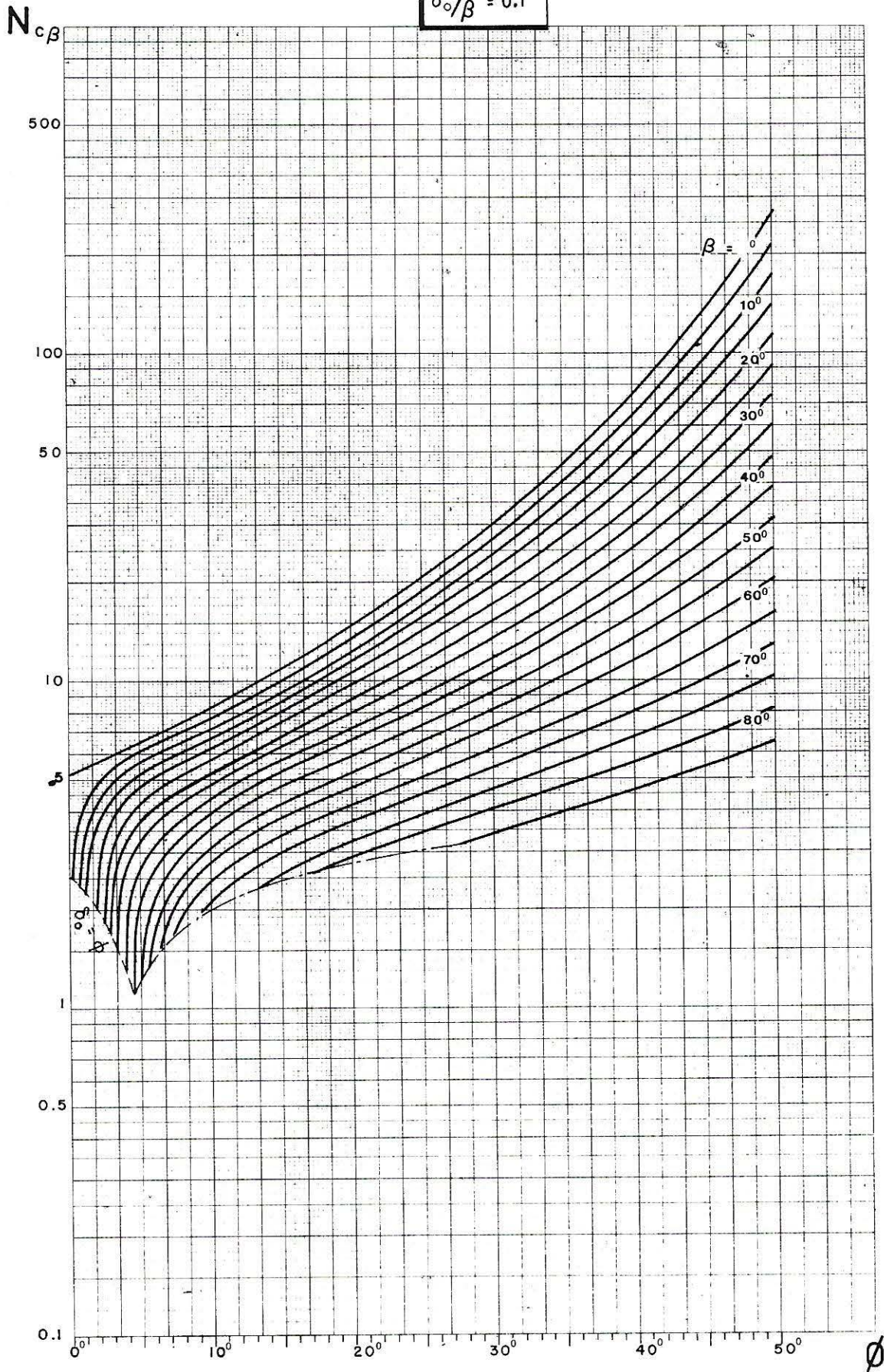
N C_β

$$\frac{\delta_0}{\beta} = 0$$



7-8

$$\delta_o/\beta = 0.1$$



7-8

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	215.9	111.8	64.62	40.46	26.93	18.81	13.65	10.20	7.81	6.06
10°	174.6	93.44	55.42	35.47	24.05	17.06	12.54	9.47	7.30	5.64
15°	141.2	78.02	47.50	31.07	21.46	15.46	11.51	8.78	6.80	5.21
20°	114.1	65.12	40.69	27.19	19.12	13.99	10.54	8.12	6.32	4.77
25°	92.26	54.32	34.83	23.78	17.02	12.63	9.64	7.49	5.85	4.31
30°	74.53	45.28	29.79	20.77	15.13	11.39	8.79	6.89	5.39	3.84
35°	60.17	37.72	25.45	18.12	13.43	10.26	8.00	6.32	4.95	3.35
40°	48.55	31.39	21.72	15.78	11.90	9.21	7.27	5.78	4.51	2.81
45°	39.13	26.10	18.54	13.73	10.52	8.26	6.58	5.26	4.09	2.18
50°	31.52	21.67	15.75	11.91	9.28	7.38	5.94	4.77	3.67	
55°	25.35	17.96	13.37	10.32	8.16	6.57	5.34	4.30	3.27	
60°	20.35	14.86	11.33	8.91	7.16	5.84	4.78	3.86	2.87	
65°	16.31	12.26	9.57	7.67	6.26	5.16	4.25	3.43	2.48	
70°	13.04	10.09	8.06	6.58	5.45	4.54	3.76	3.03	2.10	
75°	10.39	8.28	6.76	5.62	4.72	3.97	3.31	2.65		
80°	8.25	6.76	5.64	4.77	4.06	3.45	2.88			
85°	6.52	5.49	4.68	4.03	3.47					
90°										

$$\delta/\beta = 0.1$$

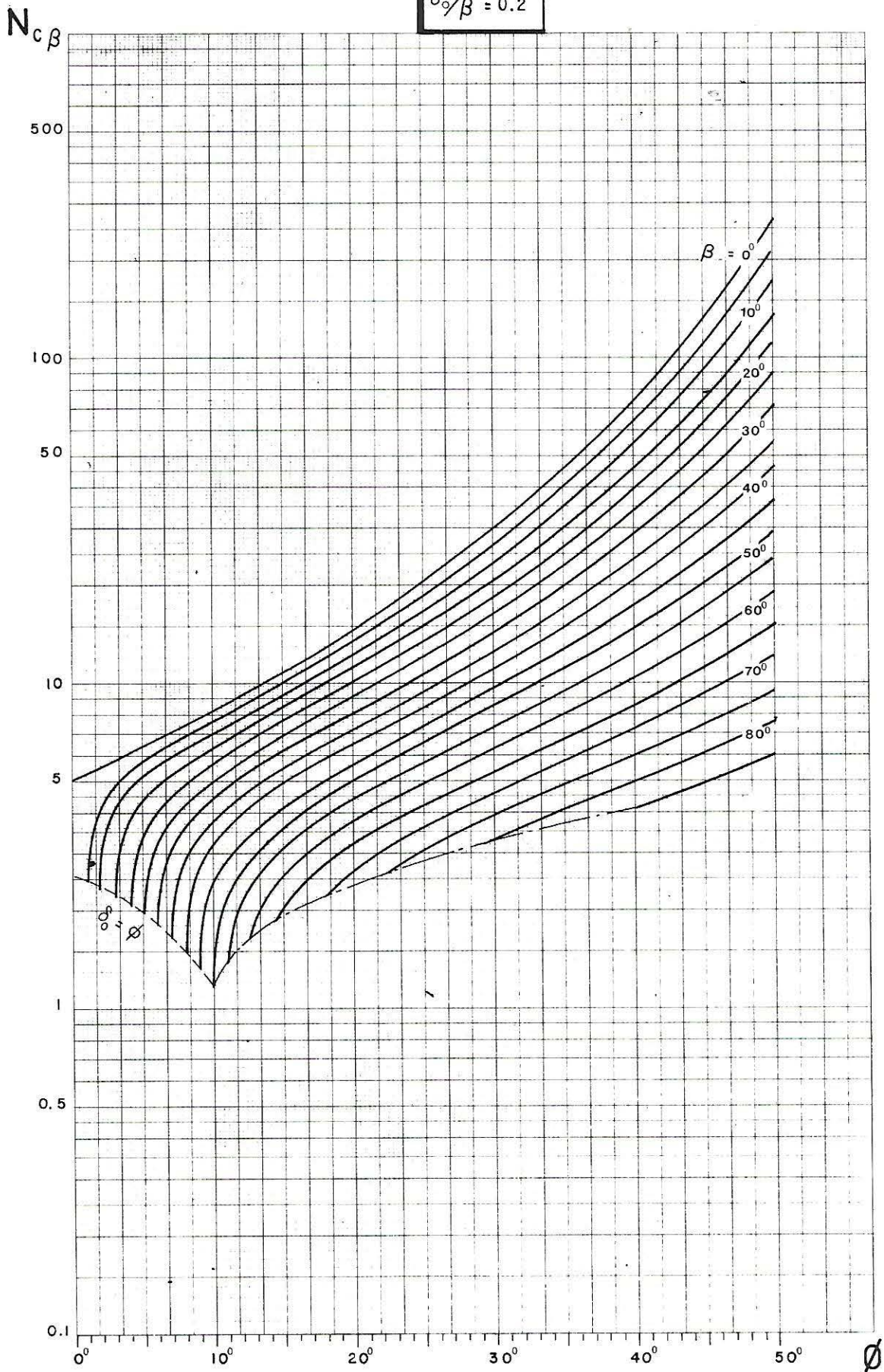
N
C β

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	215.2	111.4	63.34	40.26	26.79	18.69	13.54	10.11	7.71	5.90
10°	173.5	92.74	54.94	35.12	23.78	16.84	12.34	9.28	7.08	5.27
15°	139.8	77.13	46.88	30.60	21.09	15.14	11.22	8.49	6.46	4.56
20°	112.6	64.11	39.97	26.64	18.67	13.59	10.17	7.73	5.85	3.70
25°	90.71	53.26	34.04	23.15	16.50	12.16	9.19	7.01	5.23	1.98
30°	73.00	44.20	28.96	20.10	14.55	10.86	8.27	6.32	4.61	
35°	58.71	36.65	24.61	17.41	12.81	9.67	7.41	5.65	3.97	
40°	47.17	30.35	20.87	15.06	11.24	8.58	6.61	5.01	3.30	
45°	37.87	25.11	17.68	12.99	9.84	7.59	5.86	4.39	2.54	
50°	30.36	20.73	14.94	11.18	8.58	6.67	5.16	3.79	1.19	
55°	24.31	17.08	12.59	9.59	7.46	5.84	4.51	3.20		
60°	19.42	14.05	10.58	8.20	6.45	5.08	3.89	2.62		
65°	15.48	11.52	8.86	6.98	5.54	4.38	3.31	2.03		
70°	12.31	9.41	7.39	5.90	4.73	3.74	2.77			
75°	9.75	7.65	6.13	4.97	4.01	3.15				
80°	7.68	6.19	5.05	4.14	3.36					
85°	6.02	4.97								
90°										

$\delta/\beta = 0.2$

N C_{β}

$$\delta_0/\beta = 0.2$$



7-8

$\delta_0/\beta = 0.3$

$N_{c\beta}$

500

100

50

10

5

1

0.5

0.1

$\beta = 0^\circ$

10°

20°

30°

40°

50°

60°

70°

80°

δ_0/ϕ

ϕ

7-8

0°

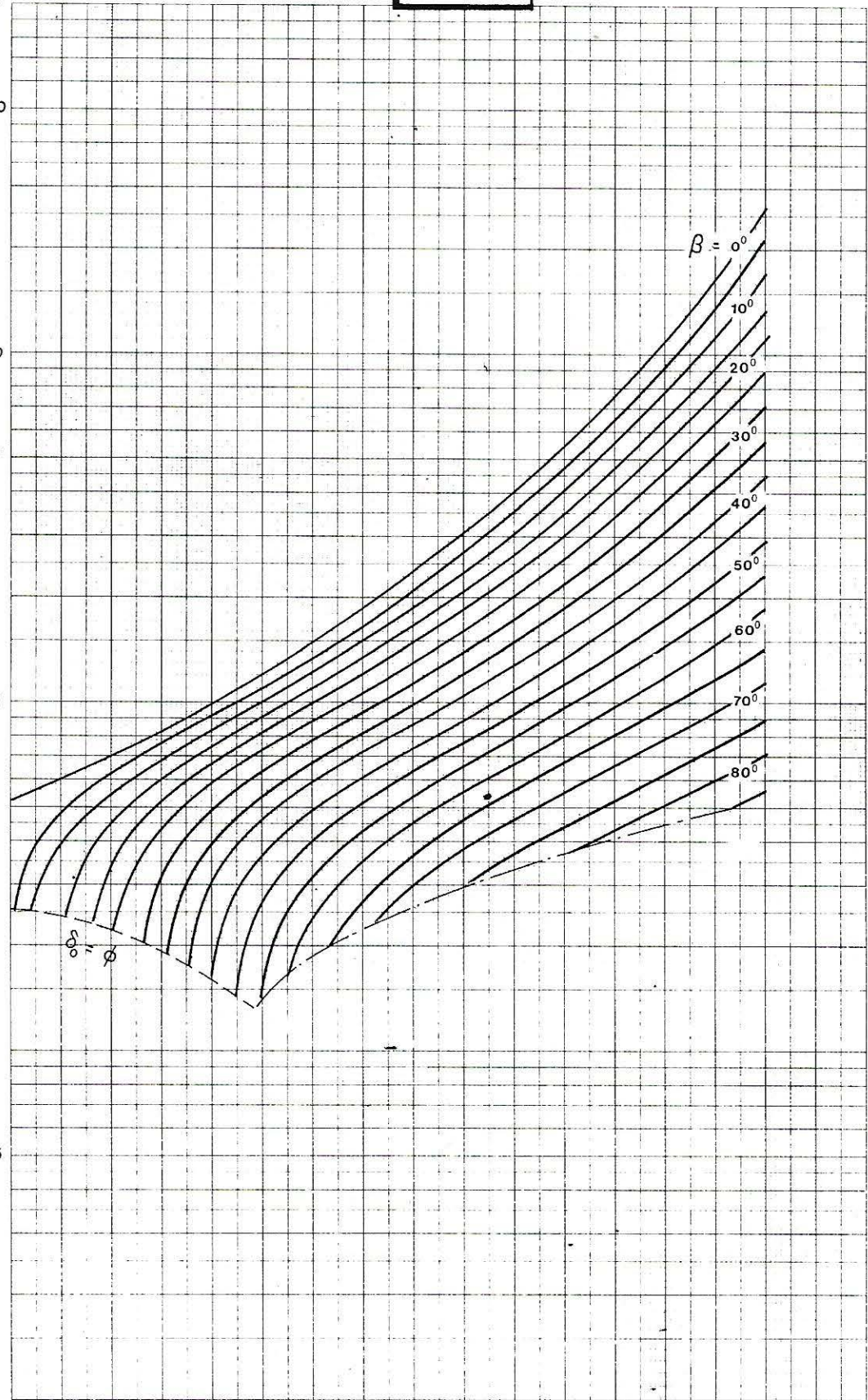
10°

20°

30°

40°

50°



$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	214.5	111.0	64.07	40.07	26.64	18.57	13.44	10.01	7.60	5.72
10°	172.3	92.03	54.46	34.77	23.51	16.61	12.13	9.08	6.84	4.80
15°	138.4	76.23	46.25	30.12	20.70	14.81	10.91	8.18	6.07	3.49
20°	111.1	63.08	39.22	26.06	18.19	13.16	9.76	7.30	5.26	
25°	89.10	52.16	33.22	22.50	15.94	11.66	8.69	6.45	4.38	
30°	71.41	43.07	28.09	19.38	13.93	10.28	7.67	5.61	3.34	
35°	57.18	35.52	23.71	16.65	12.12	9.01	6.72	4.78		
40°	45.73	29.25	19.97	14.27	10.51	7.86	5.82	3.93		
45°	36.52	24.04	16.77	12.18	9.07	6.79	4.95	3.00		
50°	29.12	19.71	14.05	10.36	7.77	5.82	4.13	1.42		
55°	23.17	16.12	11.72	8.76	6.61	4.91	3.32			
60°	18.40	13.14	9.74	7.36	5.58	4.08	2.49			
65°	14.56	10.66	8.04	6.14	4.65	3.30				
70°	11.48	8.61	6.60	5.08	3.81	2.57				
75°	9.00	6.91	5.37	4.15	3.06					
80°	7.02	5.51	4.33							
85°	5.43									
90°										

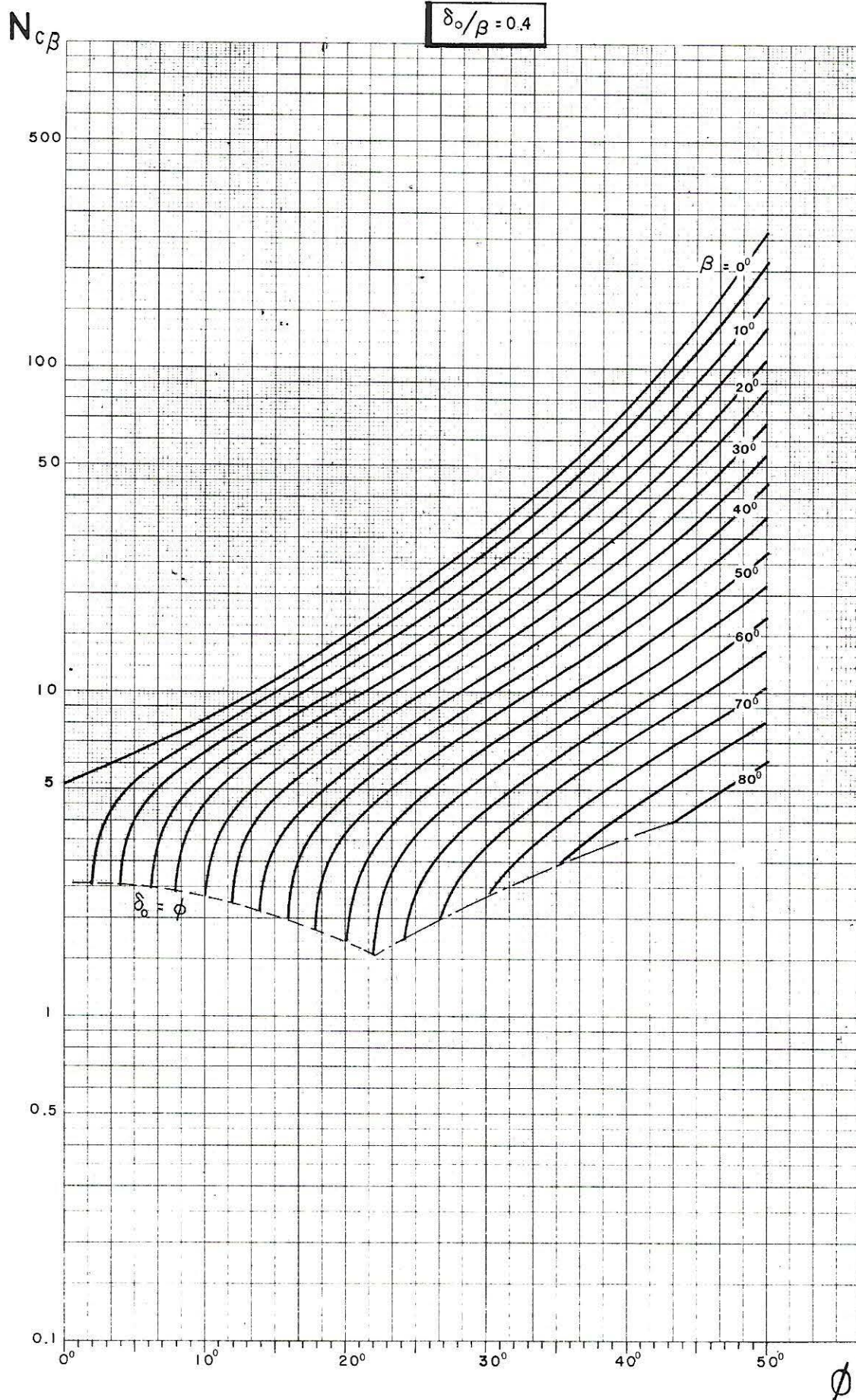
$$\delta/\beta = 0.3$$

N
C β

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	213.8	110.6	63.80	39.87	26.49	18.45	13.33	9.90	7.48	5.53
10°	171.2	91.32	53.97	34.41	23.22	16.37	11.92	8.86	6.58	4.17
15°	136.9	75.30	45.60	29.63	20.30	14.46	10.58	7.83	5.60	
20°	109.5	62.02	38.45	25.46	17.68	12.71	9.32	6.81	4.47	
25°	87.45	51.01	32.36	21.81	15.34	11.11	8.12	5.77	2.33	
30°	69.75	41.89	27.17	18.62	13.24	9.63	6.98	4.68		
35°	55.56	34.32	22.75	15.83	11.36	8.26	5.86	3.39		
40°	44.18	28.06	18.98	13.39	9.68	6.99	4.76			
45°	35.06	22.87	15.77	11.26	8.16	5.80	3.60			
50°	27.76	18.57	13.04	9.40	6.79	4.68	1.70			
55°	21.91	15.02	10.71	7.76	5.55	3.57				
60°	17.22	12.08	8.73	6.33	4.42	2.38				
65°	13.48	9.66	7.04	5.08	3.36					
70°	10.49	7.65	5.61	3.96						
75°	8.10	5.99	4.38							
80°	6.19	4.62								
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.4$$

N
C β



7-8

$N_{c\beta}$

$\delta_o/\beta = 0.5$

500

100

50

10

5

1

0.5

0.1

0°

10°

20°

30°

40°

50°

ϕ

$\beta = 0^\circ$

10°

20°

30°

40°

50°

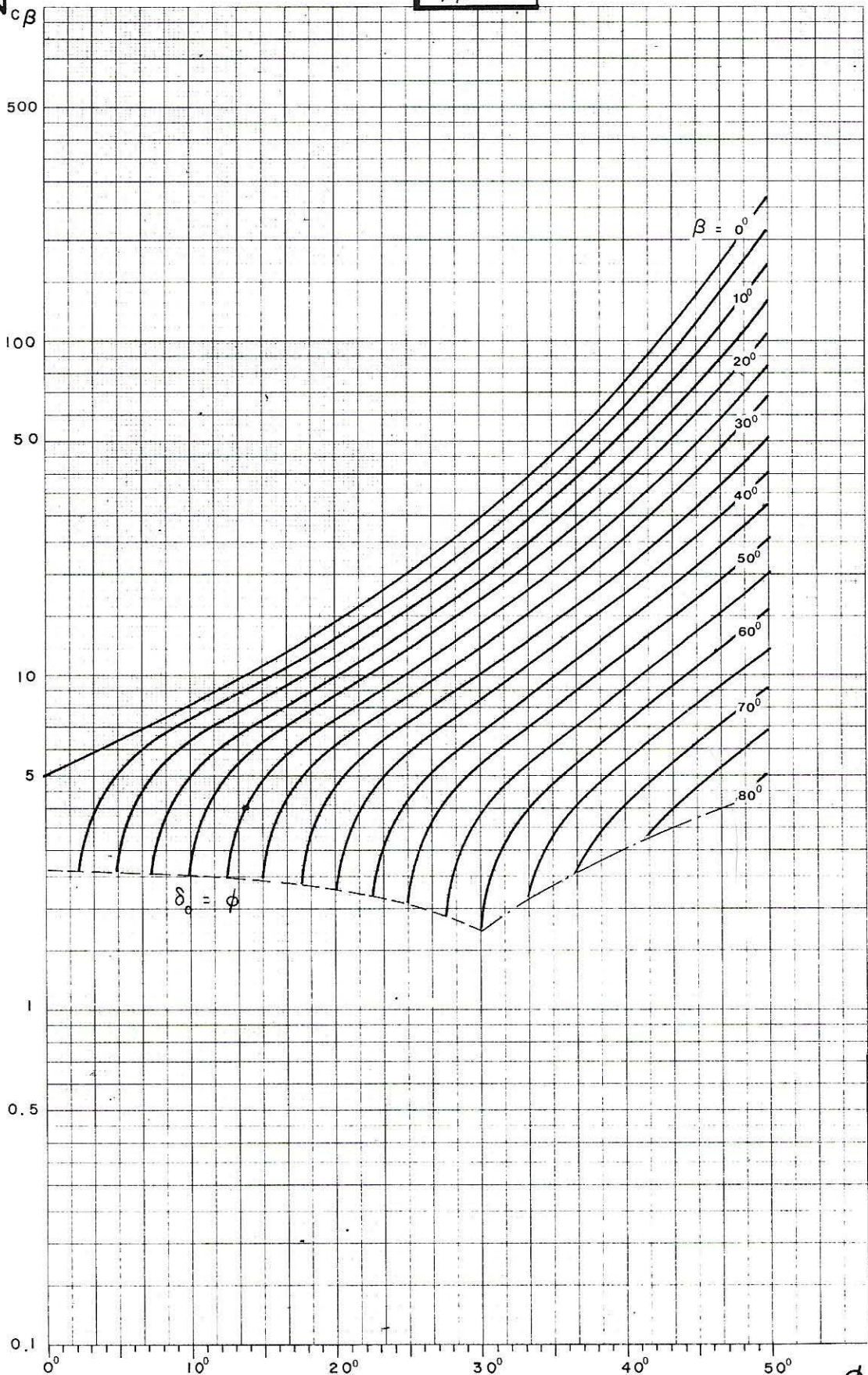
60°

70°

80°

$\delta_o = \phi$

7-8



$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	213.1	110.2	63.52	39.67	26.33	18.32	13.22	9.80	7.36	5.31
10°	170.0	90.59	53.48	34.04	22.93	16.12	11.69	8.63	6.29	2.61
15°	135.5	74.36	44.93	29.12	19.88	14.10	10.24	7.45	5.02	
20°	107.8	60.93	37.65	24.83	17.15	12.23	8.42	6.23	2.58	
25°	85.73	49.82	31.46	21.07	14.70	10.50	7.48	4.88		
30°	68.01	40.63	26.19	17.79	12.49	8.88	6.12	2.48		
35°	53.84	33.03	21.70	14.91	10.50	7.36	4.68			
40°	42.51	26.75	17.88	12.39	8.69	5.88	2.30			
45°	33.46	21.56	14.63	10.18	7.04	4.39				
50°	26.22	17.27	11.85	8.23	5.49	2.05				
55°	20.45	13.73	9.48	6.49	3.97					
60°	15.84	10.81	7.46	4.92	1.73					
65°	12.17	8.39	5.71	3.43						
70°	9.24	6.38	4.18							
75°	6.91	4.71								
80°	5.05									
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.5$$

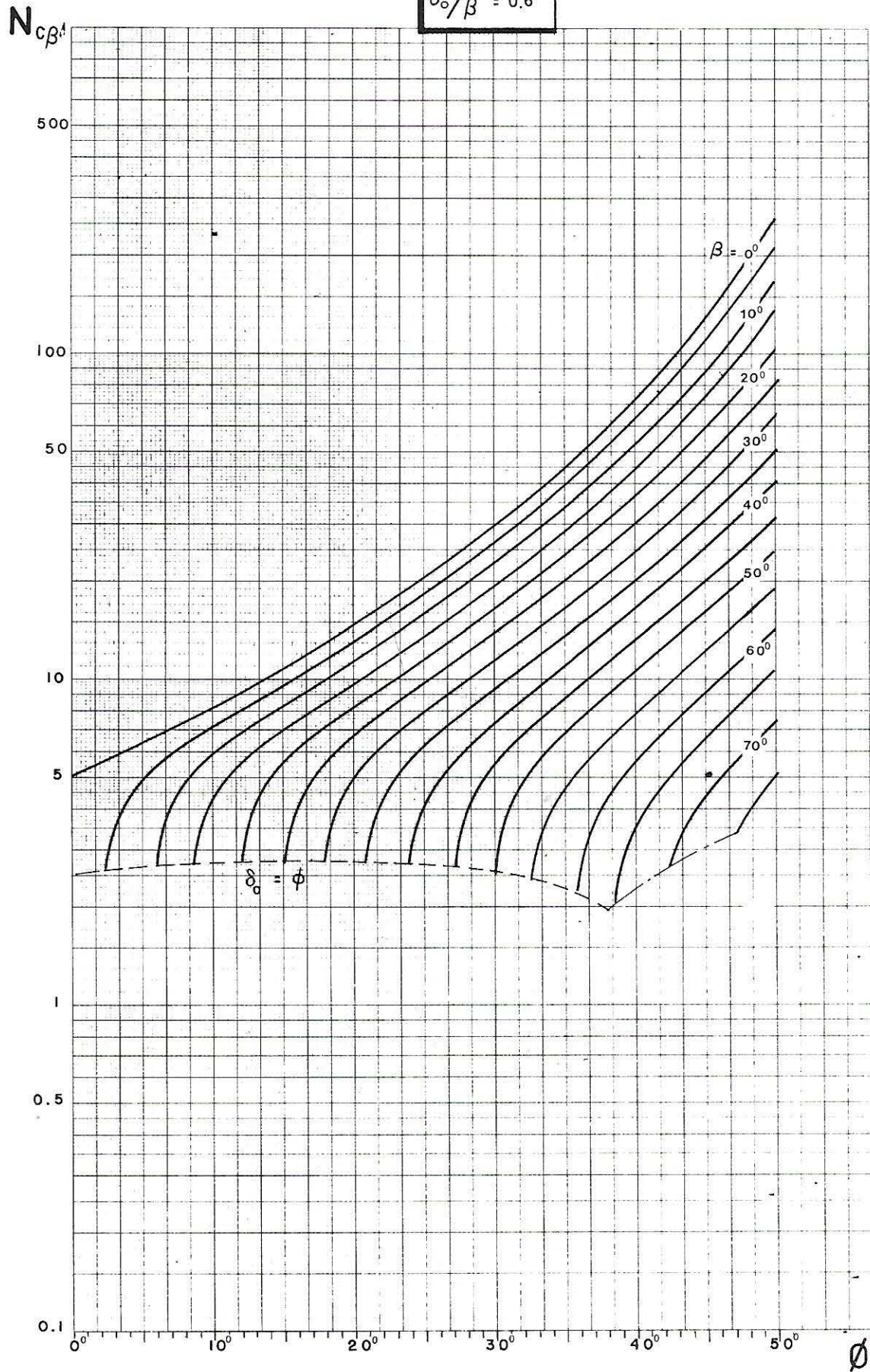
N_{Cβ}

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	212.4	109.7	63.24	39.47	26.18	18.20	13.11	9.69	7.23	5.05
10°	168.8	89.86	52.98	33.67	22.64	15.87	11.46	8.38	5.95	
15°	134.0	73.40	44.25	28.60	19.45	13.72	9.86	7.02	4.21	
20°	106.1	59.80	36.82	24.17	16.59	11.71	8.29	5.50		
25°	83.93	48.57	30.50	20.29	14.00	9.82	6.70	2.78		
30°	66.17	39.29	25.13	16.88	11.65	8.00	4.93			
35°	51.99	31.63	20.54	13.88	9.49	6.19				
40°	40.68	25.30	16.63	11.23	7.47	4.12				
45°	31.65	20.07	13.28	8.85	5.47					
50°	24.45	15.74	10.40	6.79	2.50					
55°	18.71	12.15	7.89	4.53						
60°	14.13	9.15	5.63							
65°	10.46	6.62	3.37							
70°	7.52	4.39								
75°	5.11									
80°										
85°										
90°										

$\delta_0 / \beta = 0.6$

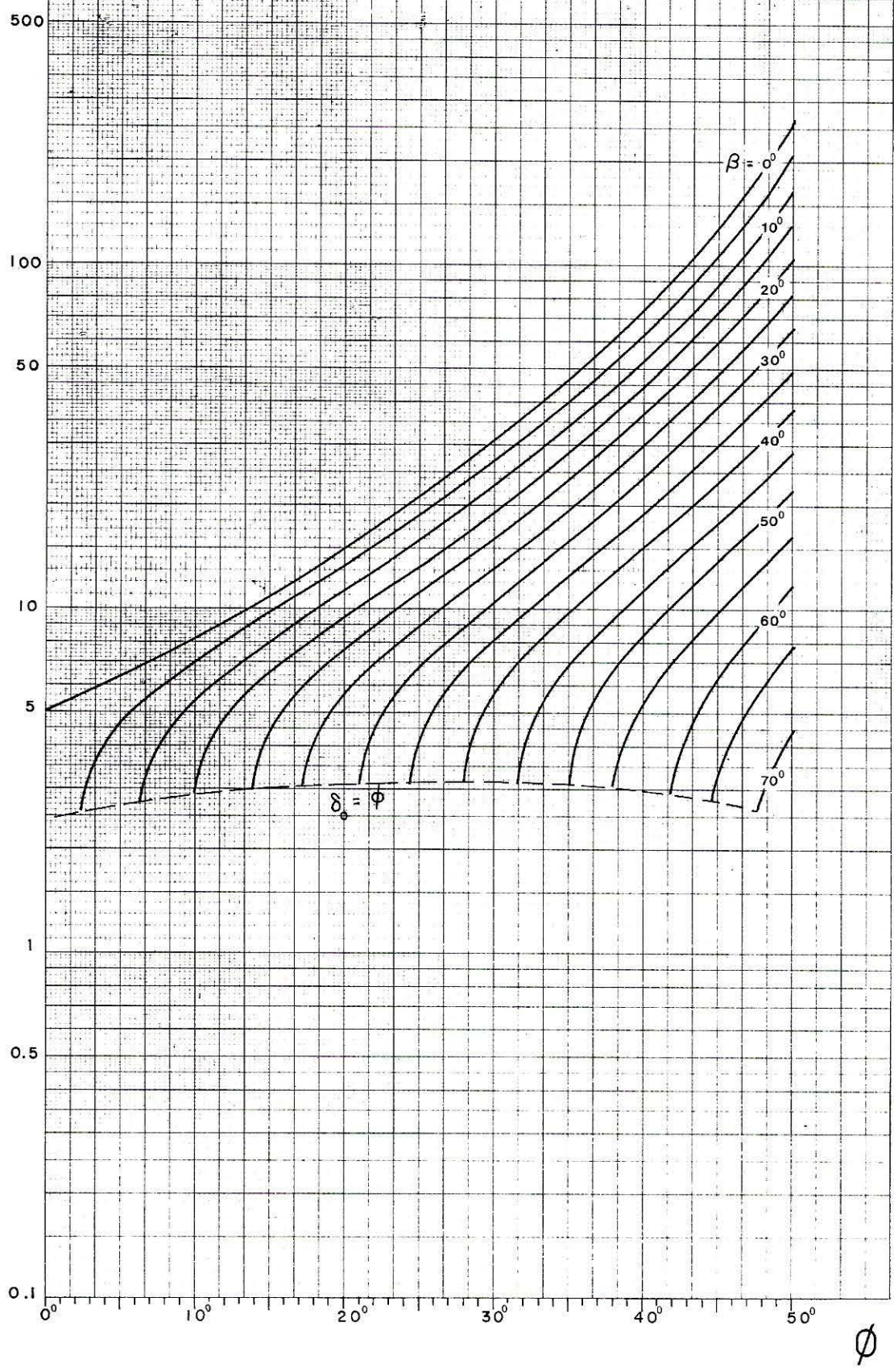
N C_β

$$\delta_o/\beta = 0.6$$



$\delta_0/\beta = 0.7$

$N_{c\beta}$



7-8

ϕ

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	211.6	109.3	62.96	39.27	26.03	18.07	13.00	9.58	7.10	4.76
10°	167.6	89.11	52.46	33.29	22.33	15.61	11.21	8.12	5.57	
15°	132.4	72.41	43.54	28.06	19.00	13.31	9.46	6.53		
20°	104.4	58.63	35.95	23.47	15.99	11.14	7.67	4.46		
25°	82.05	47.25	29.49	19.44	13.23	9.04	5.69			
30°	64.21	37.85	23.97	15.87	10.68	6.90				
35°	49.98	30.09	19.25	12.69	8.25	4.21				
40°	38.63	23.66	15.18	9.80	5.70					
45°	29.57	18.31	11.64	7.04						
50°	22.33	13.84	8.46	3.11						
55°	16.53	10.04	5.31							
60°	11.83	6.65								
65°	7.93									
70°	4.33									
75°										
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.7$$

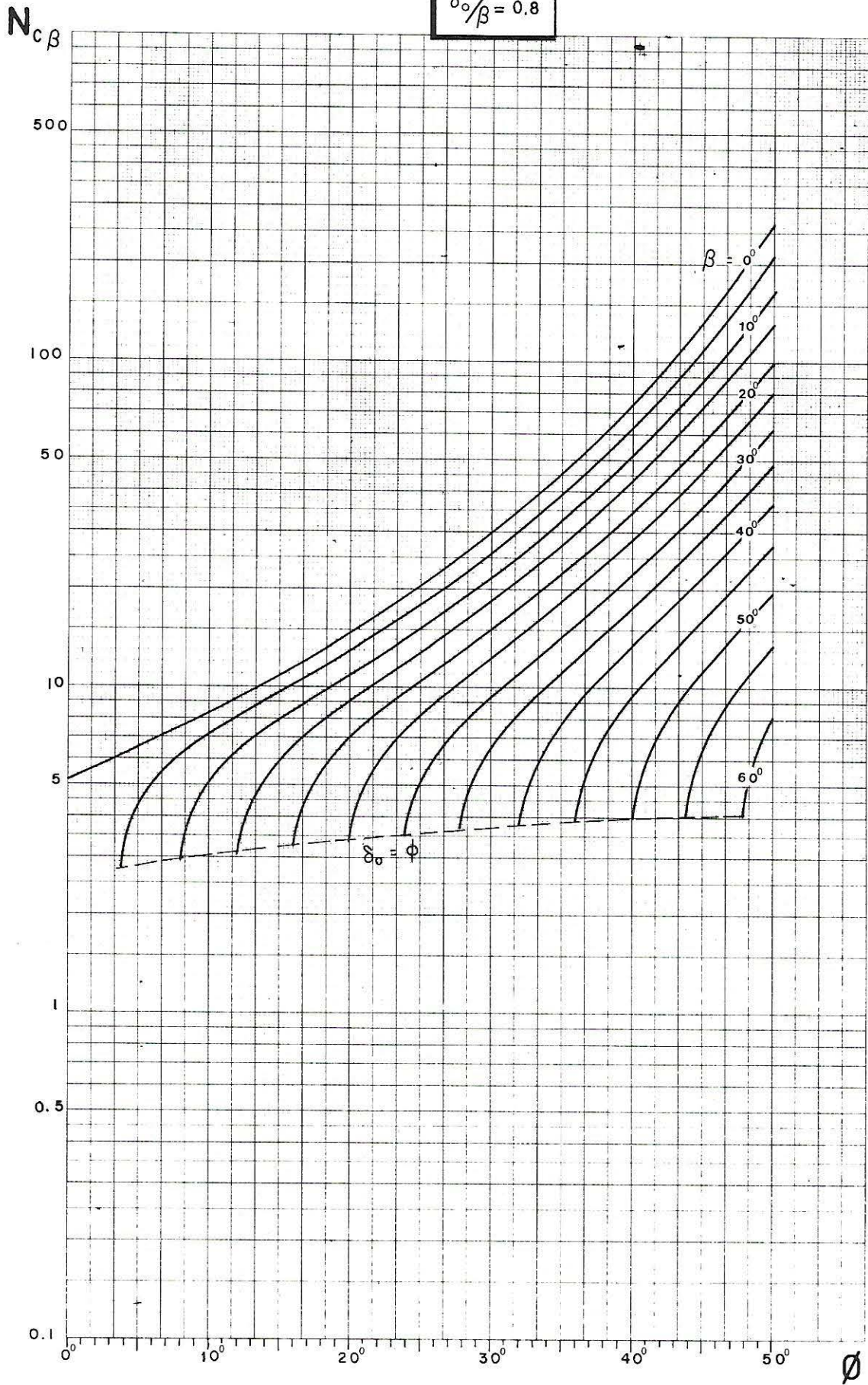
N_{Cβ}

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	210.9	108.9	62.68	39.07	25.87	17.94	12.88	9.46	6.96	4.41
10°	166.4	88.35	51.94	32.90	22.02	15.34	10.96	7.84	5.12	
15°	130.9	71.40	42.82	27.49	18.53	12.88	9.02	5.95		
20°	102.6	57.41	35.04	22.74	15.34	10.51	6.93			
25°	80.07	45.85	28.40	18.52	12.38	8.11	3.36			
30°	62.10	36.29	22.70	14.74	9.52	5.23				
35°	47.75	28.36	17.77	11.26	6.49					
40°	36.29	21.74	13.41	7.84						
45°	27.10	16.14	9.40							
50°	19.67	11.26	3.98							
55°	13.54	6.41								
60°	8.08									
65°										
70°										
75°										
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.8$$

N C_β

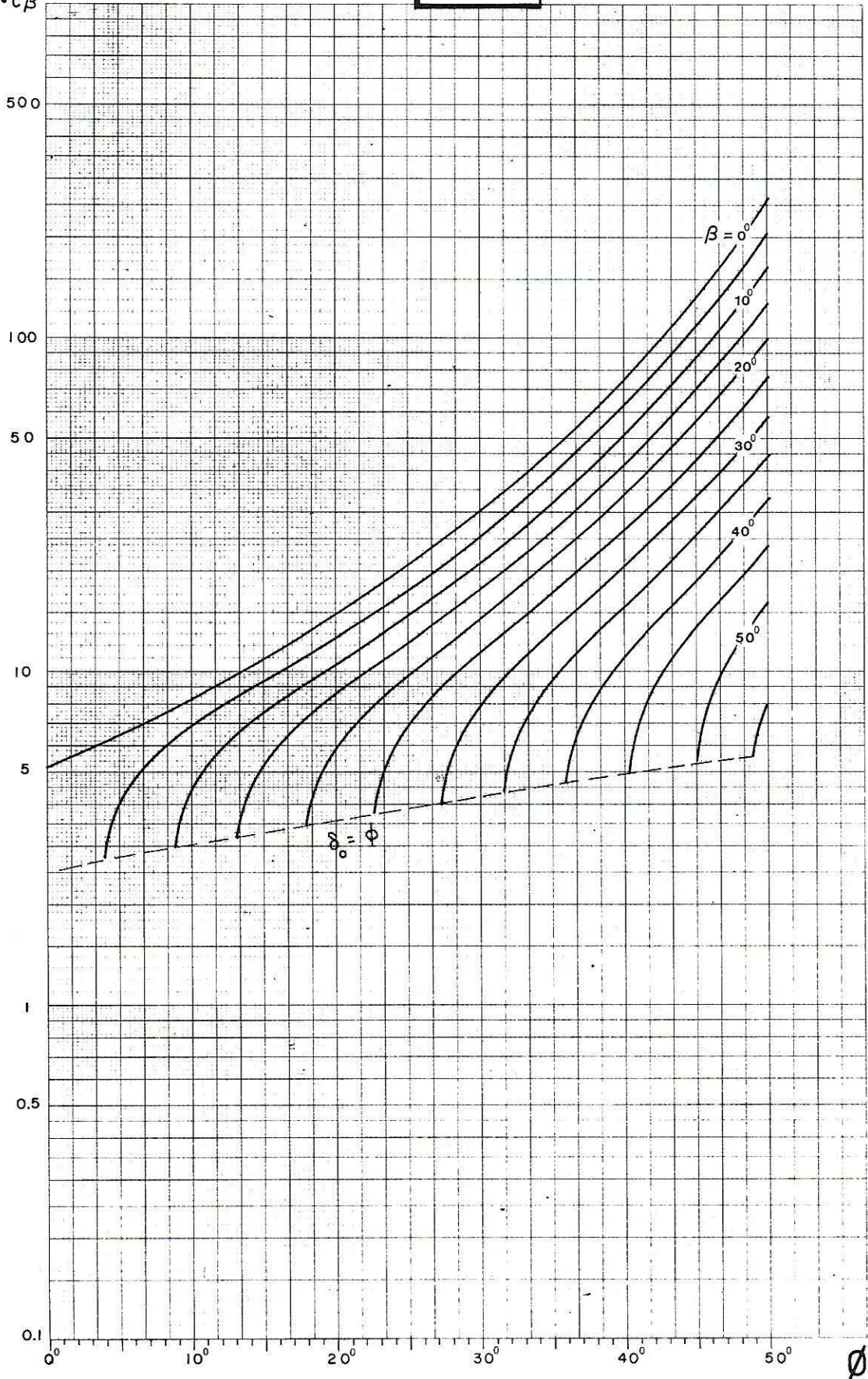
$$\delta_o/\beta = 0.8$$



$N_{c\beta}$

$\delta_o/\beta = 0.9$

7-8



$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	210.2	108.4	62.39	38.86	25.71	17.81	12.76	9.34	6.81	3.95
10°	165.2	87.59	51.41	32.50	21.70	15.06	10.69	7.54	4.52	
15°	129.3	70.35	42.07	26.91	18.04	12.42	8.53	5.19		
20°	100.7	56.13	34.08	21.95	14.64	9.80	5.97			
25°	77.97	44.35	27.23	17.50	11.39	6.90				
30°	59.80	34.57	21.27	13.41	8.02					
35°	45.26	26.38	16.00	9.38						
40°	33.56	19.41	11.07							
45°	24.03	13.22								
50°	16.00	5.28								
55°	7.91									
60°										
65°										
70°										
75°										
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0/\beta = 0.9$$

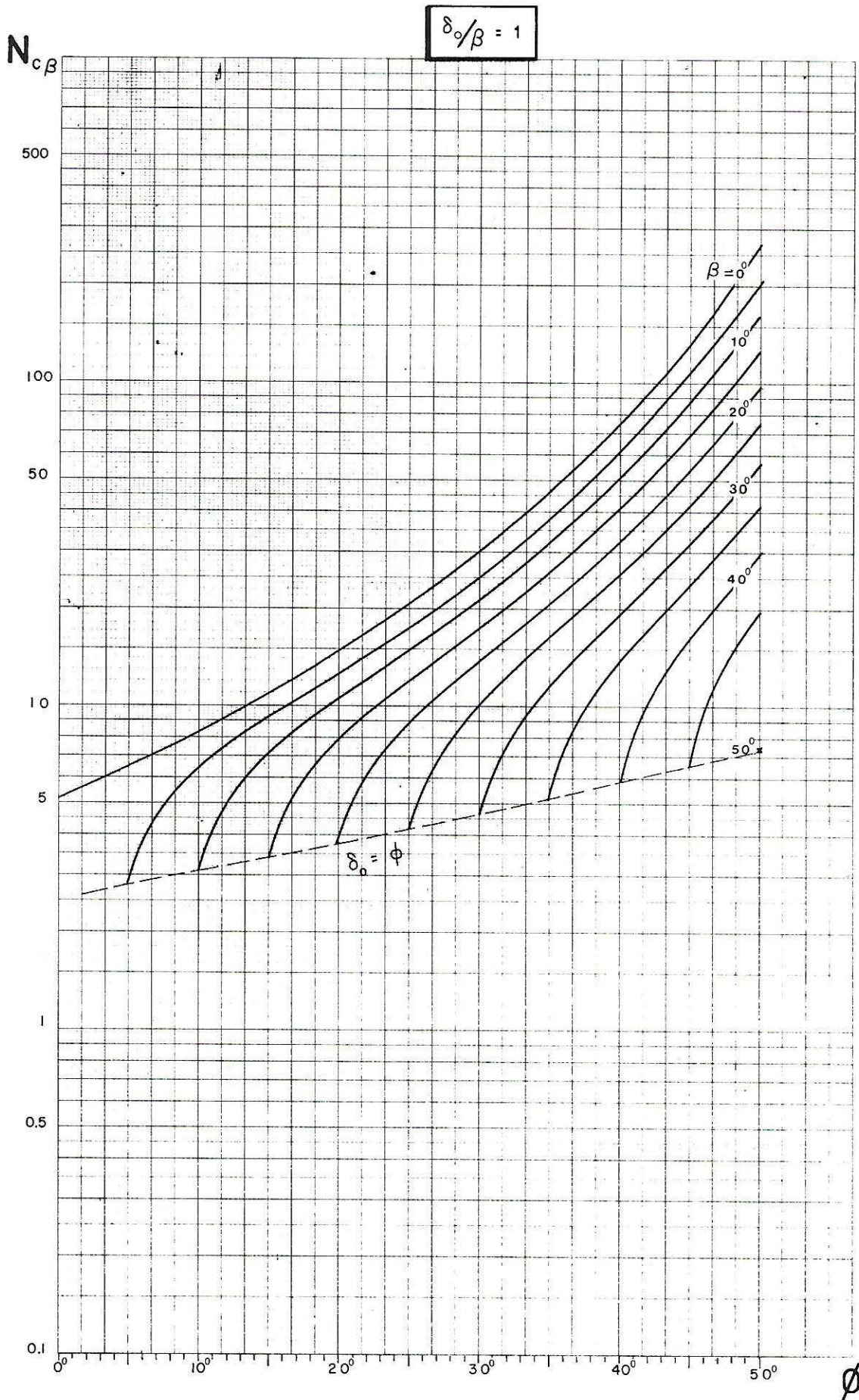
N C_β

7-8

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15	10°	5°
0°	266.9	133.9	75.31	46.12	30.14	20.72	14.83	10.98	8.34	6.49
5°	209.5	108.0	62.10	38.65	25.55	17.67	12.64	9.22	6.66	2.82
10°	163.9	86.81	50.87	32.10	21.37	14.77	10.41	7.20	3.10	
15°	127.6	69.28	41.29	26.30	17.52	11.93	7.98	3.41		
20°	98.78	54.78	33.07	21.11	13.87	8.97	3.76			
25°	75.73	42.74	25.94	16.37	10.22	4.15				
30°	57.28	32.65	19.64	11.79	4.60					
35°	42.41	24.05	13.78	5.13						
40°	30.25	16.39	5.74							
45°	19.90	6.48								
50°	7.40									
55°										
60°										
65°										
70°										
75°										
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 1$$

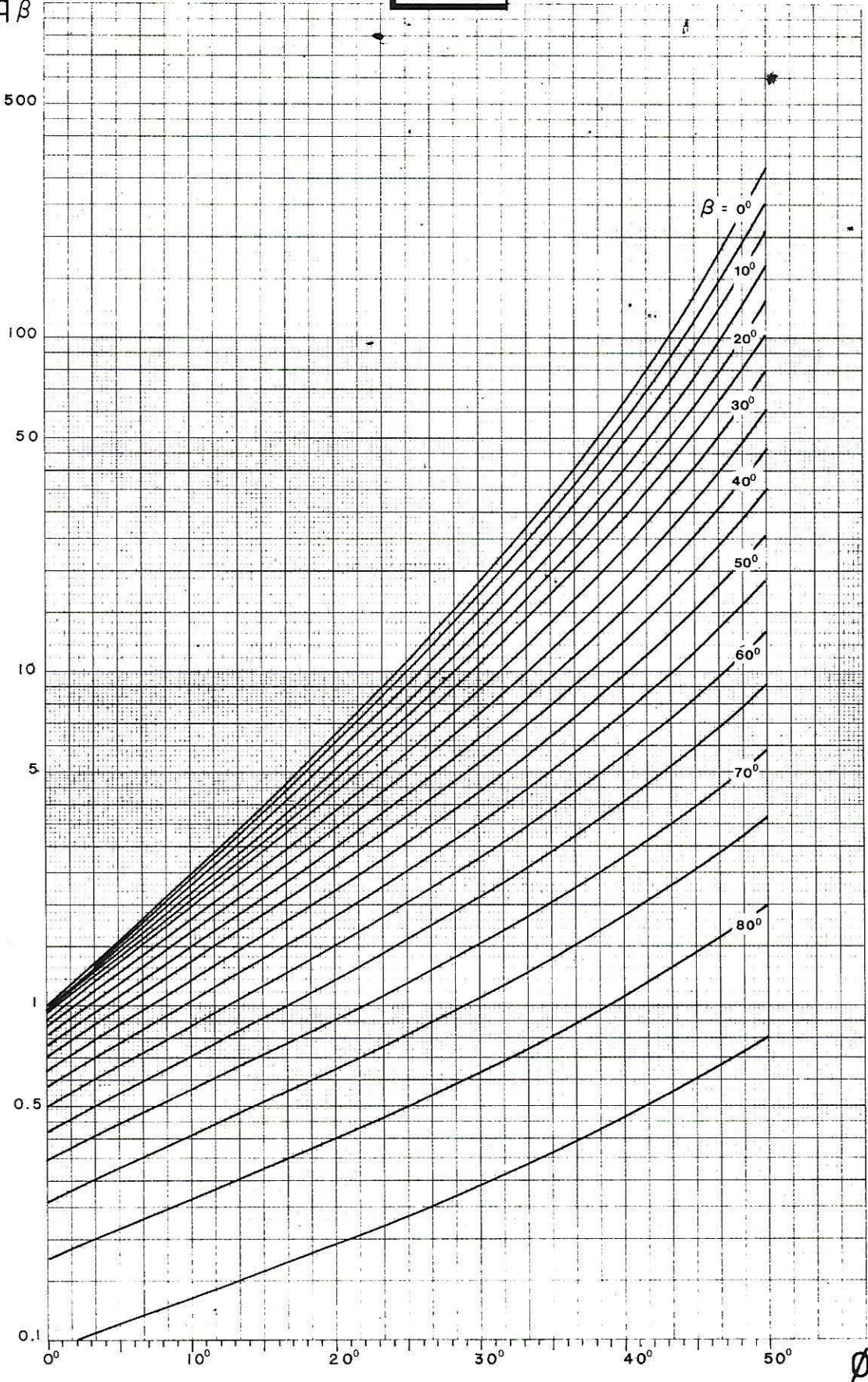
N C_β



7-8

$N_{q\beta}$

$\delta_o/\beta = 0$



7-8

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	258.2	112.8	55.24	29.35	16.57	9.79	5.98	3.75	2.39	1.54
10°	207.3	93.69	47.17	25.68	14.81	8.92	5.55	3.53	2.29	1.50
15°	165.1	77.17	39.96	22.29	13.14	8.07	5.11	3.31	2.18	1.45
20°	130.5	63.05	33.58	19.19	11.56	7.24	4.66	3.07	2.05	1.39
25°	102.2	51.07	27.97	16.38	10.08	6.43	4.22	2.83	1.92	1.32
30°	79.32	40.99	23.09	13.85	8.71	5.67	3.79	2.58	1.78	1.24
35°	60.94	32.56	18.86	11.59	7.45	4.94	3.36	2.33	1.63	1.15
40°	46.29	25.57	15.24	9.60	6.30	4.26	2.95	2.08	1.48	1.06
45°	34.70	19.83	12.15	7.84	5.25	3.62	2.55	1.83	1.32	0.97
50°	25.62	15.14	9.54	6.31	4.32	3.04	2.18	1.59	1.17	0.86
55°	18.57	11.34	7.35	4.98	3.48	2.50	1.82	1.35	1.01	0.76
60°	13.15	8.30	5.54	3.84	2.75	2.01	1.49	1.12	0.85	0.65
65°	9.03	5.90	4.04	2.87	2.10	1.56	1.18	0.91	0.70	0.54
70°	5.93	4.01	2.83	2.06	1.54	1.17	0.90	0.70	0.55	0.43
75°	3.65	2.55	1.85	1.38	1.05	0.81	0.64	0.51	0.40	0.32
80°	1.99	1.43	1.07	0.82	0.64	0.50	0.40	0.32	0.26	0.21
85°	0.81	0.60	0.46	0.36	0.29	0.23	0.19	0.16	0.13	0.11
90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

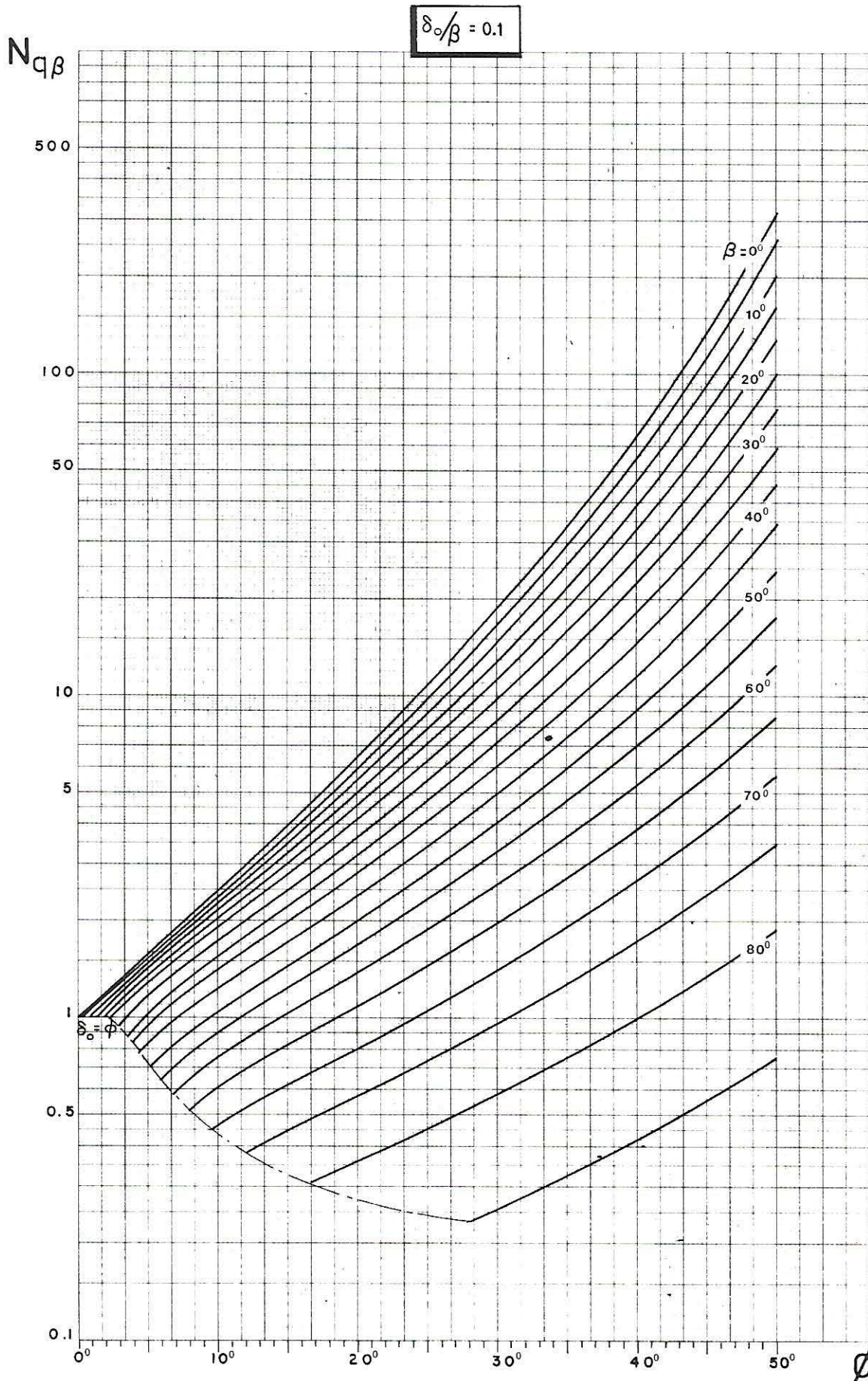
$\delta_0 / \beta = 0$

N $q\beta$

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	257.3	112.4	55.01	29.22	16.49	9.37	5.94	3.72	2.37	1.52
10°	205.9	93.00	46.78	25.44	14.66	8.82	5.48	3.48	2.25	1.47
15°	163.5	76.33	39.46	21.98	12.93	7.93	5.01	3.23	2.12	1.40
20°	128.8	62.13	33.02	18.83	11.31	7.07	4.54	2.98	1.98	1.33
25°	100.5	50.13	27.39	15.99	9.81	6.24	4.08	2.72	1.84	1.24
30°	77.79	40.08	22.51	13.46	8.43	5.46	3.63	2.46	1.69	1.15
35°	59.56	31.72	18.31	11.21	7.17	4.73	3.20	2.20	1.53	1.05
40°	45.08	24.81	14.72	9.23	6.03	4.05	2.79	1.95	1.37	0.95
45°	33.68	19.16	11.69	7.50	5.00	3.43	2.40	1.70	1.21	0.84
50°	24.78	14.57	9.13	6.00	4.08	2.85	2.03	1.46	1.06	
55°	17.90	10.87	7.01	4.71	3.27	2.33	1.68	1.23	0.90	
60°	12.63	7.93	5.25	3.62	2.56	1.86	1.37	1.01	0.75	
65°	8.64	5.60	3.81	2.69	1.95	1.44	1.07	0.81	0.60	
70°	5.66	3.79	2.65	1.91	1.41	1.06	0.81	0.62	0.46	
75°	3.46	2.40	1.72	1.27	0.96	0.73	0.57	0.44		
80°	1.88	1.34	0.99	0.75	0.58	0.45	0.35			
85°	0.76	0.56	0.43	0.33	0.26					
90°										

$\delta/\beta = 0.1$

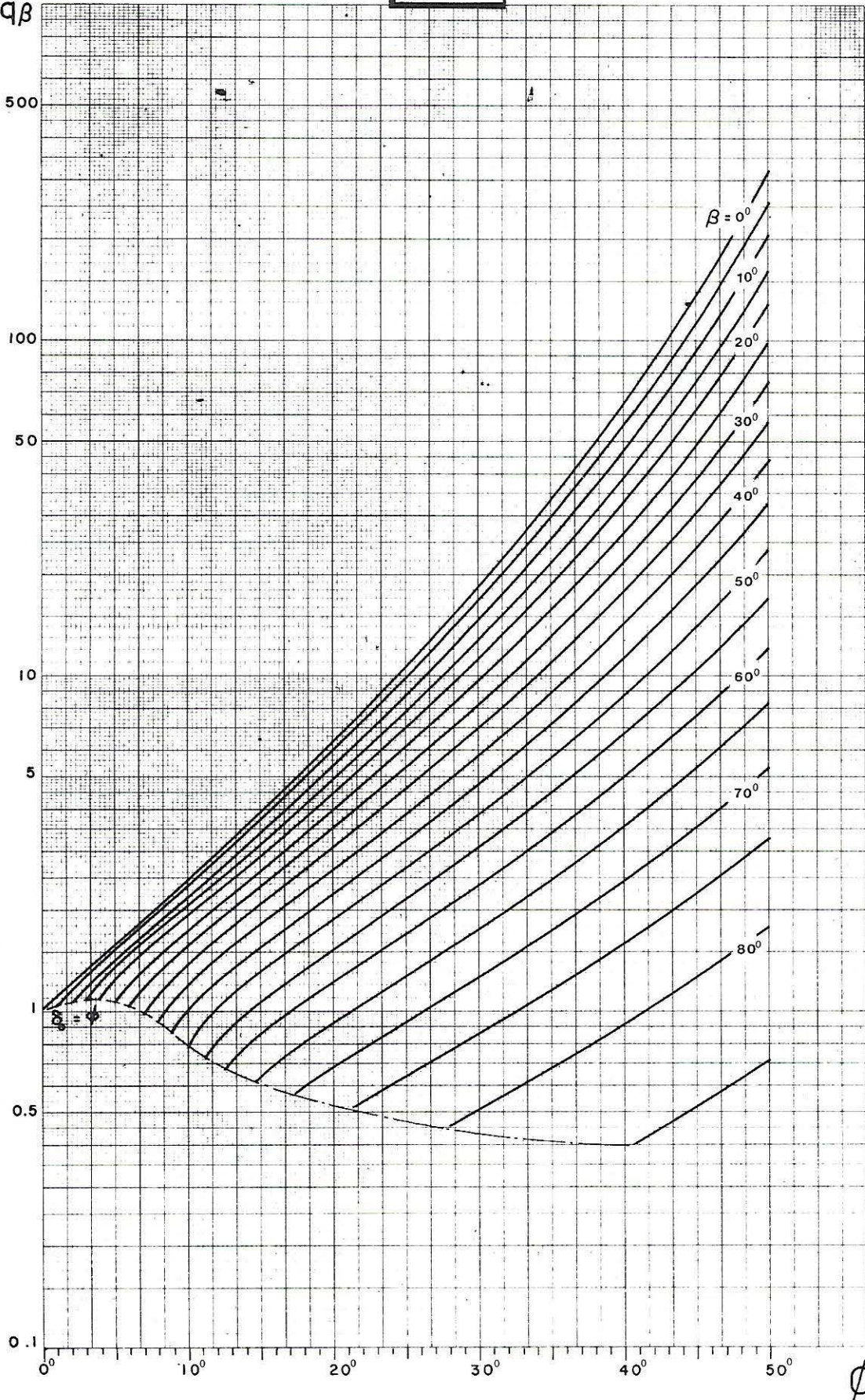
N $q \beta$



7-8

$\delta_0/\beta = 0.2$

$N_{q\beta}$



7-8

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	256.5	112.0	54.78	29.08	16.40	9.68	5.90	3.69	2.35	1.51
10°	204.6	92.31	46.39	25.20	14.50	8.71	5.41	3.43	2.21	1.43
15°	161.9	75.47	38.96	21.66	12.72	7.78	4.91	3.16	2.06	1.35
20°	127.1	61.19	32.45	18.46	11.06	6.89	4.41	2.88	1.90	1.24
25°	98.8	49.17	26.79	15.60	9.54	6.04	3.93	2.61	1.74	1.06
30°	76.21	39.14	21.91	13.05	8.14	5.25	3.47	2.33	1.57	
35°	58.13	30.84	17.73	10.81	6.87	4.51	3.03	2.06	1.39	
40°	43.83	24.02	14.18	8.84	5.74	3.83	2.61	1.79	1.21	
45°	32.62	18.46	11.19	7.14	4.72	3.21	2.21	1.54	1.02	
50°	23.90	13.97	8.70	5.67	3.83	2.64	1.85	1.29	0.77	
55°	17.19	10.37	6.63	4.42	3.04	2.13	1.51	1.06		
60°	12.07	7.52	4.94	3.37	2.36	1.68	1.20	0.85		
65°	8.22	5.29	3.56	2.48	1.77	1.28	0.93	0.65		
70°	5.36	3.56	2.46	1.75	1.27	0.93	0.68			
75°	3.26	2.24	1.59	1.16	0.85	0.64				
80°	1.76	1.24	0.91	0.67	0.51					
85°	0.71	0.52								
90°										

$\delta_0 / \beta = 0.2$

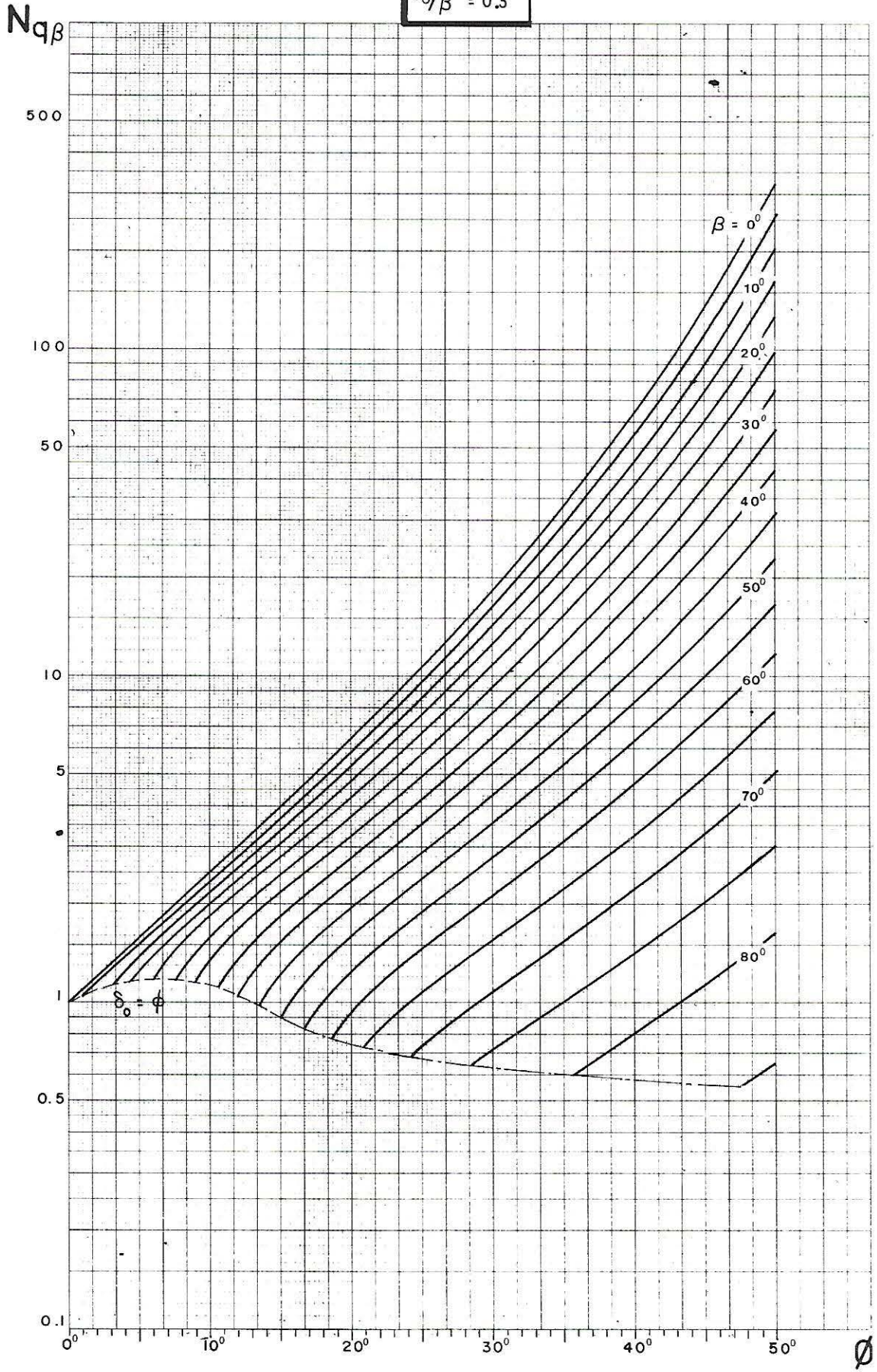
N $q \beta$

$\Phi \backslash \beta$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	255.6	111.6	54.55	28.94	16.31	9.62	5.87	3.66	2.33	1.49
10°	203.2	91.62	45.99	24.96	14.35	8.61	5.33	3.38	2.17	1.39
15°	160.3	74.60	38.45	21.34	12.51	7.63	4.80	3.08	2.00	1.26
20°	125.3	60.22	31.86	18.08	10.80	6.71	4.28	2.77	1.81	
25°	97.15	48.17	26.17	15.18	9.24	5.83	3.77	2.47	1.60	
30°	74.57	38.17	21.28	12.62	7.83	5.01	3.28	2.17	1.37	
35°	56.64	29.92	17.11	10.37	6.55	4.26	2.82	1.86		
40°	42.51	23.17	13.60	8.42	5.41	3.57	2.38	1.57		
45°	31.48	17.70	10.66	6.74	4.41	2.94	1.98	1.27		
50°	22.95	13.31	8.22	5.30	3.52	2.38	1.61	0.88		
55°	16.41	9.82	6.21	4.09	2.76	1.88	1.26			
60°	11.46	7.07	4.58	3.08	2.11	1.45	0.95			
65°	7.75	4.93	3.27	2.24	1.55	1.07				
70°	5.02	3.29	2.23	1.55	1.09	0.75				
75°	3.03	2.05	1.42	1.01	0.71					
80°	1.62	1.13	0.80							
85°	0.65									
90°										

$$\delta/\beta = 0.3$$

N $q\beta$

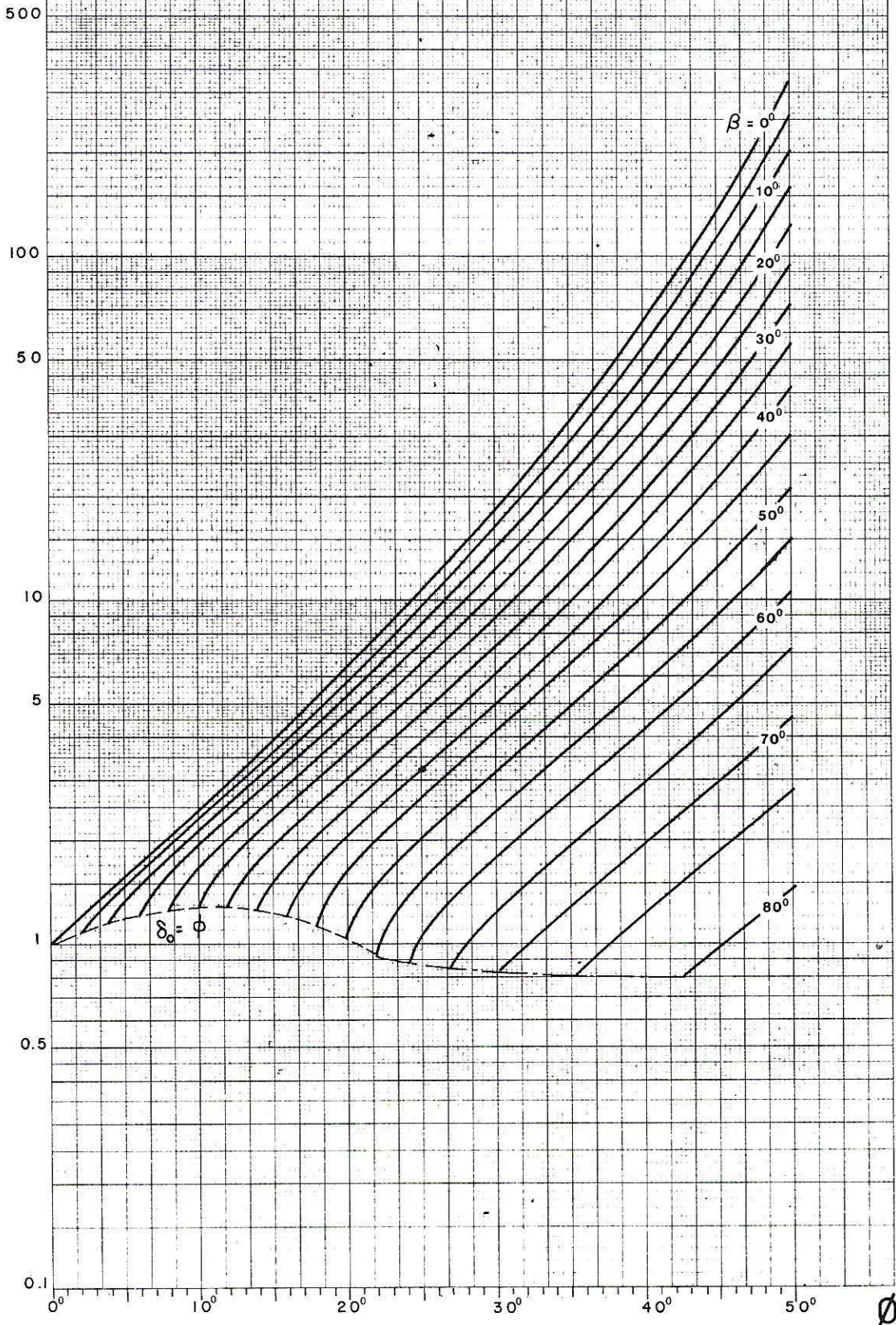
$$\delta_0/\beta = 0.3$$



7-8

$\delta_0/\beta = 0.4$

$N_{q\beta}$



7-8

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	254.8	111.1	54.32	28.81	16.23	9.56	5.83	3.64	2.31	1.47
10°	201.9	90.91	45.59	24.71	14.19	8.50	5.25	3.32	2.12	1.34
15°	158.6	73.70	37.92	21.01	12.28	7.48	4.68	2.99	1.92	
20°	123.5	59.22	31.26	17.69	10.53	6.51	4.13	2.65	1.68	
25°	95.36	47.14	25.51	14.74	8.93	5.60	3.58	2.30	1.27	
30°	72.86	37.14	20.61	12.15	7.49	4.75	3.06	1.95		
35°	55.06	28.93	16.45	9.90	6.19	3.97	2.56	1.56		
40°	41.10	22.26	12.96	7.95	5.04	3.26	2.09			
45°	30.25	16.88	10.06	6.28	4.04	2.62	1.63			
50°	21.90	12.58	7.67	4.87	3.16	2.04	1.04			
55°	15.55	9.19	5.73	3.69	2.41	1.53				
60°	10.76	6.54	4.16	2.71	1.77	1.05				
65°	7.21	4.50	2.92	1.92	1.24					
70°	4.61	2.96	1.95	1.29						
75°	2.75	1.81	1.21							
80°	1.45	0.97								
85°										
90°										

$$\delta/\beta = 0.4$$

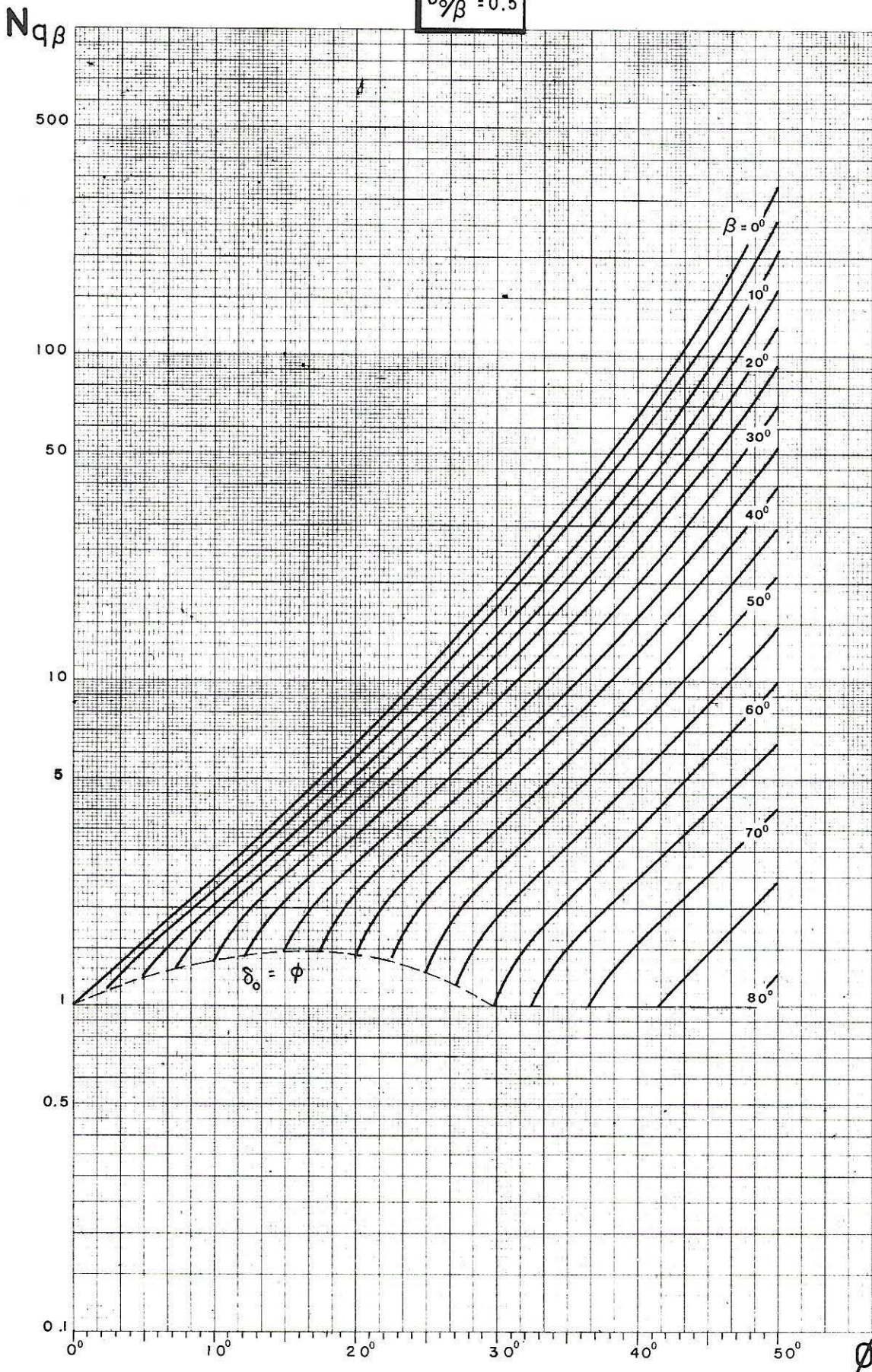
N $q\beta$

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	254.0	110.7	54.09	28.67	16.14	9.51	5.79	3.61	2.29	1.45
10°	200.5	90.20	45.18	24.46	14.02	8.39	5.17	3.26	2.07	1.21
15°	156.9	72.79	37.38	20.66	12.05	7.31	4.56	2.89	1.82	
20°	121.7	58.20	30.63	17.27	10.24	6.30	3.96	2.50	1.36	
25°	93.50	46.06	24.83	14.28	8.60	5.34	3.37	2.09		
30°	71.06	36.05	19.89	11.65	7.11	4.45	2.79	1.44		
35°	53.38	27.88	15.73	9.37	5.78	3.63	2.21			
40°	39.58	21.26	12.26	7.41	4.61	2.86	1.40			
45°	28.90	15.95	9.38	5.75	3.58	2.15				
50°	20.73	11.75	7.03	4.34	2.68	1.25				
55°	14.55	8.45	5.14	3.18	1.88					
60°	9.94	5.90	3.63	2.22	1.00					
65°	6.55	3.96	2.44	1.43						
70°	4.11	2.52	1.54							
75°	2.39	1.47								
80°	1.21									
85°										
90°										

$\delta_0 / \beta = 0.5$

N $q \beta$

$$\delta_0/\beta = 0.5$$



$\delta_0/\beta = 0.6$

$N_{q\beta}$

500

100

50

10

5

1

0.5

0.1

0°

10°

20°

30°

40°

50°

ϕ

$\beta = 0^\circ$

10°

20°

30°

40°

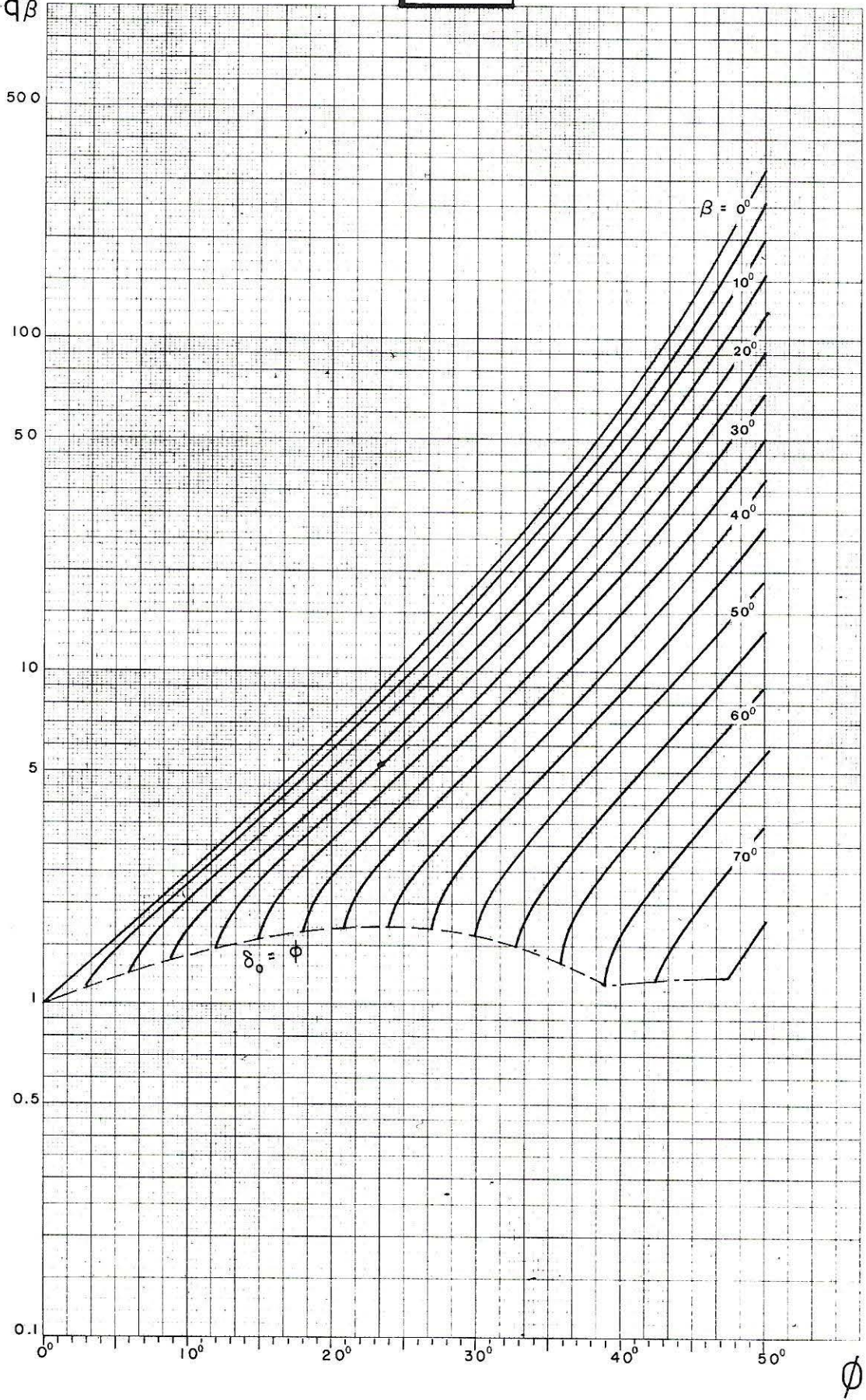
50°

60°

70°

$\delta_0 = \phi$

7-8



$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	253.1	110.3	53.86	28.53	16.05	9.45	5.75	3.58	2.26	1.43
10°	199.1	89.48	44.76	24.20	13.85	8.27	5.09	3.19	2.02	
15°	155.2	71.86	36.83	20.31	11.81	7.14	4.43	2.78	1.68	
20°	119.8	57.13	29.97	16.84	9.94	6.07	3.77	2.32		
25°	91.56	44.93	24.10	13.78	8.23	5.05	3.11	1.58		
30°	69.16	34.89	19.12	11.10	6.69	4.10	2.42			
35°	51.58	26.73	14.94	8.78	5.31	3.18				
40°	37.90	20.15	11.46	6.79	4.07	2.23				
45°	27.38	14.90	8.59	5.09	2.94					
50°	19.37	10.76	6.25	3.64	1.57					
55°	13.36	7.54	4.37	2.39						
60°	8.92	5.07	2.86							
65°	5.69	3.22	1.61							
70°	3.40	1.84								
75°	1.83									
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.6$$

N $q \beta$

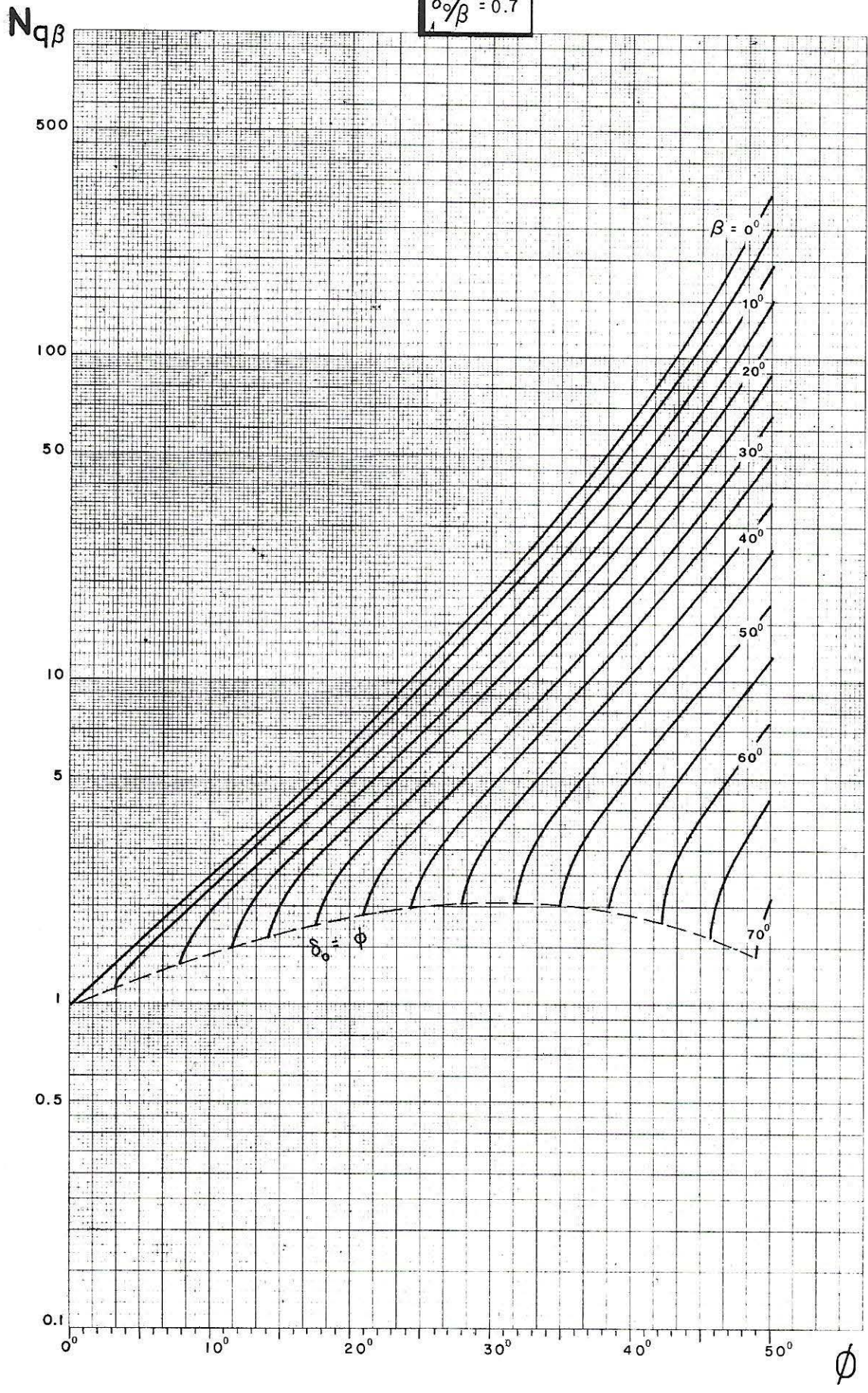
7-8

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	252.3	109.9	53.62	28.39	15.96	9.39	5.71	3.55	2.24	1.41
10°	197.7	88.74	44.34	23.94	13.68	8.15	5.00	3.13	1.95	
15°	153.4	70.91	36.26	19.94	11.56	6.96	4.29	2.65		
20°	117.9	56.03	29.29	16.38	9.61	5.82	3.56	2.06		
25°	89.53	43.73	23.33	13.24	7.83	4.72	2.78			
30°	67.13	33.65	18.29	10.49	6.21	3.65				
35°	49.61	25.46	14.05	8.10	4.72	2.43				
40°	36.03	18.89	10.52	6.02	3.28					
45°	25.63	13.65	7.61	4.19						
50°	17.75	9.54	5.20	2.04						
55°	11.87	6.33	3.13							
60°	7.55	3.82								
65°	4.42									
70°	2.11									
75°										
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.7$$

N $q \beta$

$$\frac{\delta_0}{\beta} = 0.7$$



7-8

$$\delta_0/\beta = 0.8$$

$N_{q\beta}$

500

100

50

10

5

1

0.5

0.1

0°

10°

20°

30°

40°

50°

ϕ

$\beta = 0^\circ$

10°

20°

30°

40°

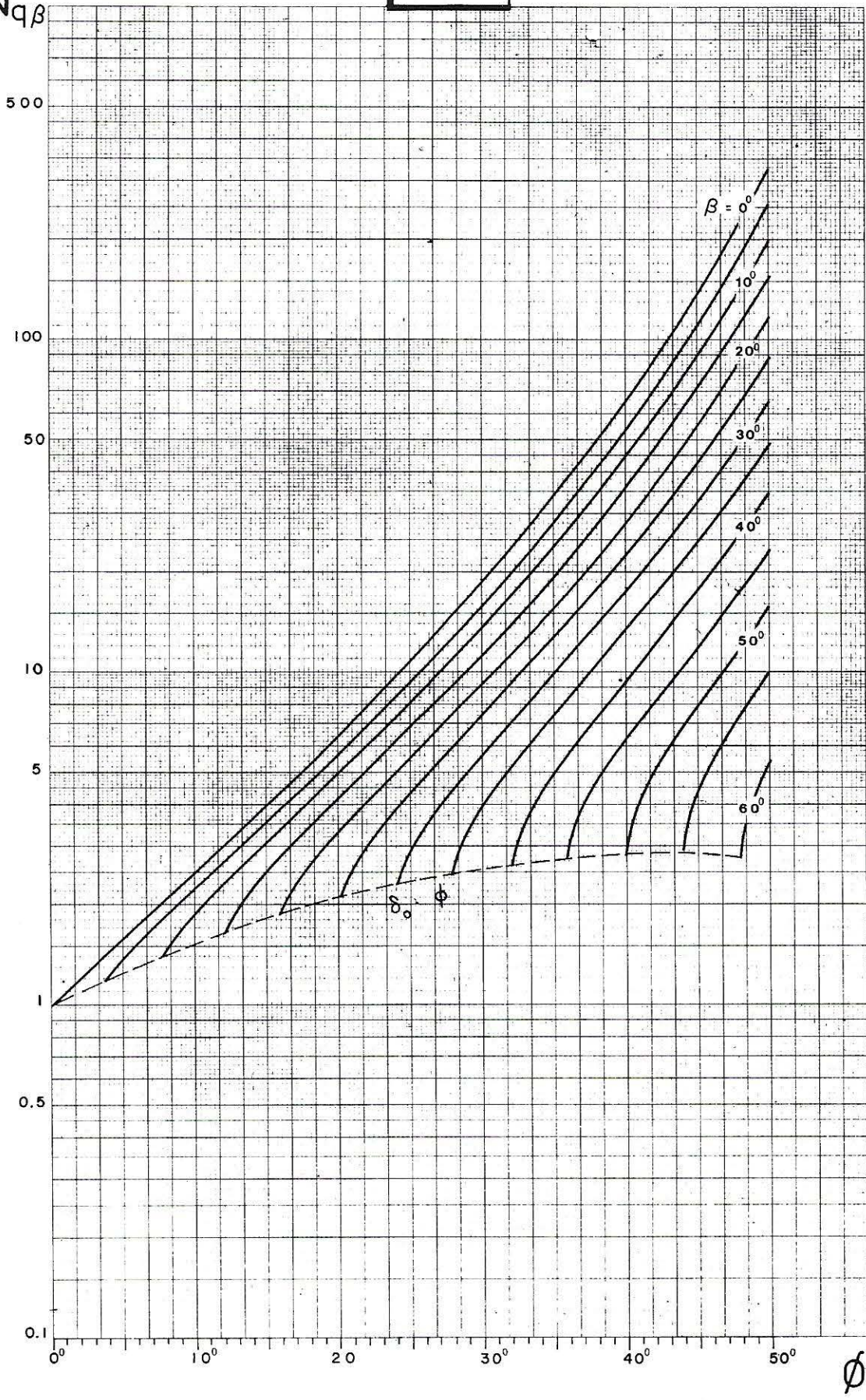
50°

60°

δ_0

ϕ

7-8



$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	251.4	109.5	53.39	28.25	15.87	9.33	5.66	3.52	2.22	1.38
10°	196.3	88.00	43.91	23.67	13.50	8.03	4.91	3.05	1.87	
15°	151.6	69.93	35.67	19.56	11.30	6.77	4.13	2.50		
20°	115.8	54.88	28.57	15.90	9.26	5.54	3.31			
25°	87.39	42.46	22.50	12.66	7.38	4.33	2.01			
30°	64.95	32.29	17.36	9.80	5.63	2.97				
35°	47.44	24.05	13.03	7.28	3.88					
40°	33.90	17.42	9.39	4.97						
45°	23.54	12.12	6.28							
50°	15.71	7.88	2.79							
55°	9.82	4.25								
60°	5.31									
65°										
70°										
75°										
80°										
85°										
90°										

$\delta_0 / \beta = 0.8$

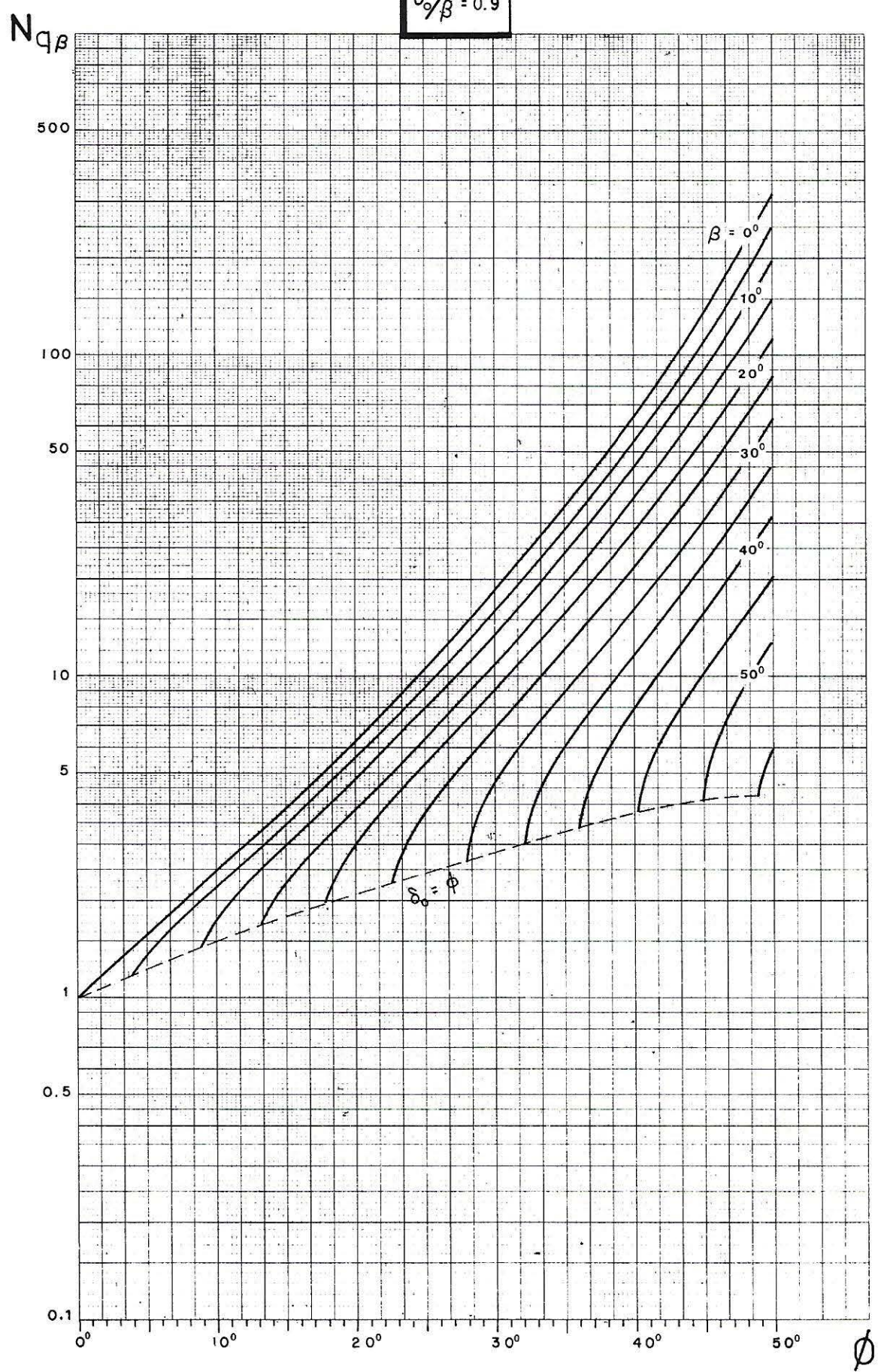
N $q \beta$

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	250.6	109.0	53.15	28.10	15.78	9.27	5.62	3.49	2.19	1.34
10°	194.8	87.24	43.47	23.40	13.32	7.90	4.81	2.97	1.77	
15°	149.8	68.92	35.06	19.16	11.02	6.56	3.96	2.30		
20°	113.7	53.68	27.81	15.38	8.88	5.23	2.98			
25°	85.13	41.10	21.61	12.01	6.86	3.82				
30°	62.59	30.81	16.32	9.00	4.87					
35°	45.00	22.43	11.82	6.20						
40°	31.40	15.63	7.88							
45°	20.96	10.05								
50°	12.90	4.04								
55°	5.98									
60°										
65°										
70°										
75°										
80°										
85°										
90°										

$$\delta_0 / \beta = 0.9$$

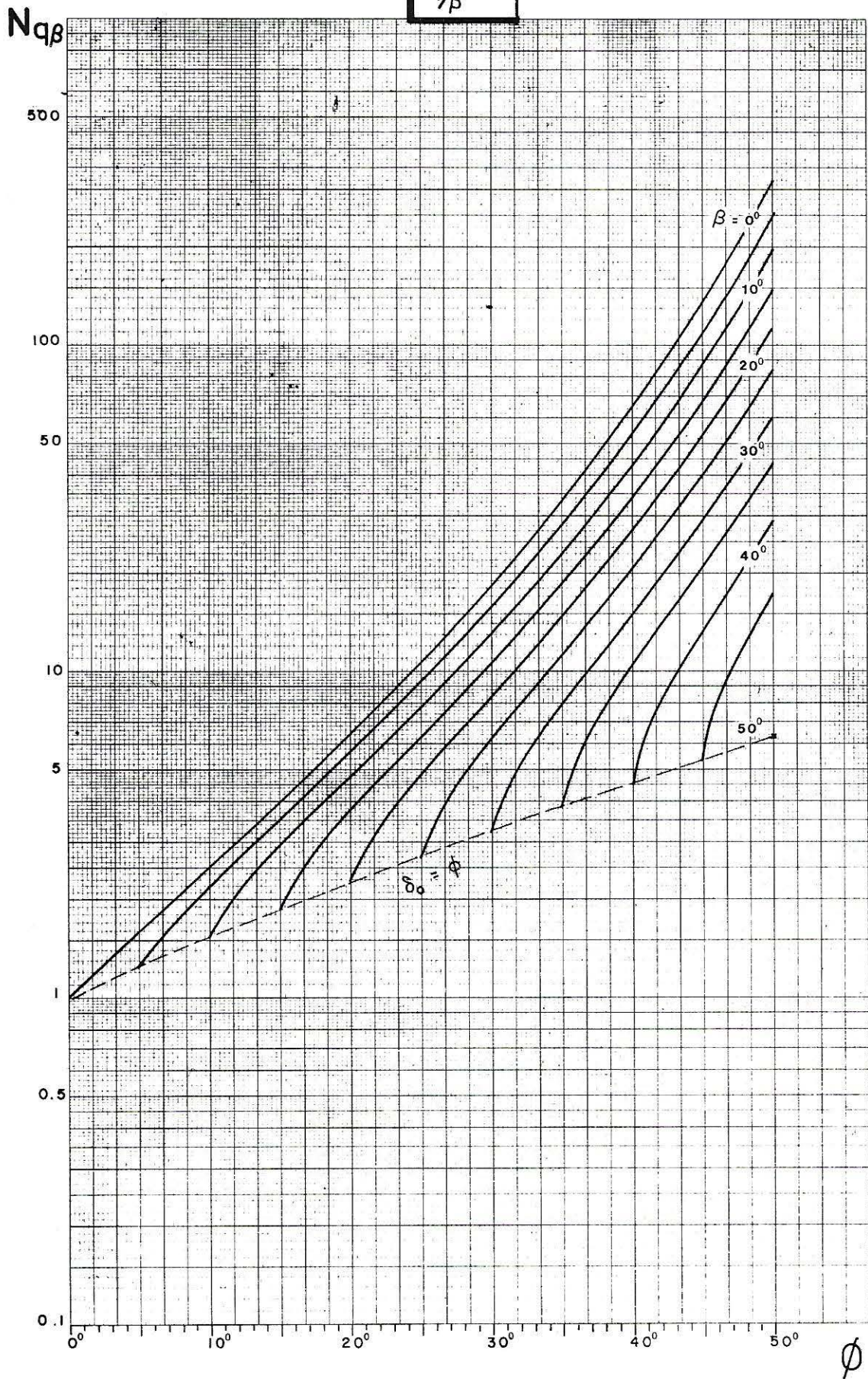
N $q \beta$

$$\delta_0/\beta = 0.9$$



7-8

$\delta_0/\beta = 1$



7-8

$\beta \backslash \phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°
0°	319.1	134.9	64.20	33.30	18.40	10.66	6.40	3.94	2.47	1.57
5°	249.7	108.6	52.91	27.96	15.69	9.20	5.58	3.45	2.16	1.24
10°	193.4	86.47	43.02	23.12	13.13	7.77	4.71	2.88	1.52	
15°	147.9	67.88	34.43	18.75	10.73	6.34	3.77	1.85		
20°	111.5	52.42	27.01	14.83	8.46	4.87	2.22			
25°	82.71	39.64	20.63	11.29	6.25	2.66				
30°	59.99	29.15	15.14	8.01	3.17					
35°	42.22	20.52	10.29	3.76						
40°	28.38	13.32	4.46							
45°	17.47	5.29								
50°	6.31									
55°										
60°										
65°										
70°										
75°										
80°										
85°										
90°										

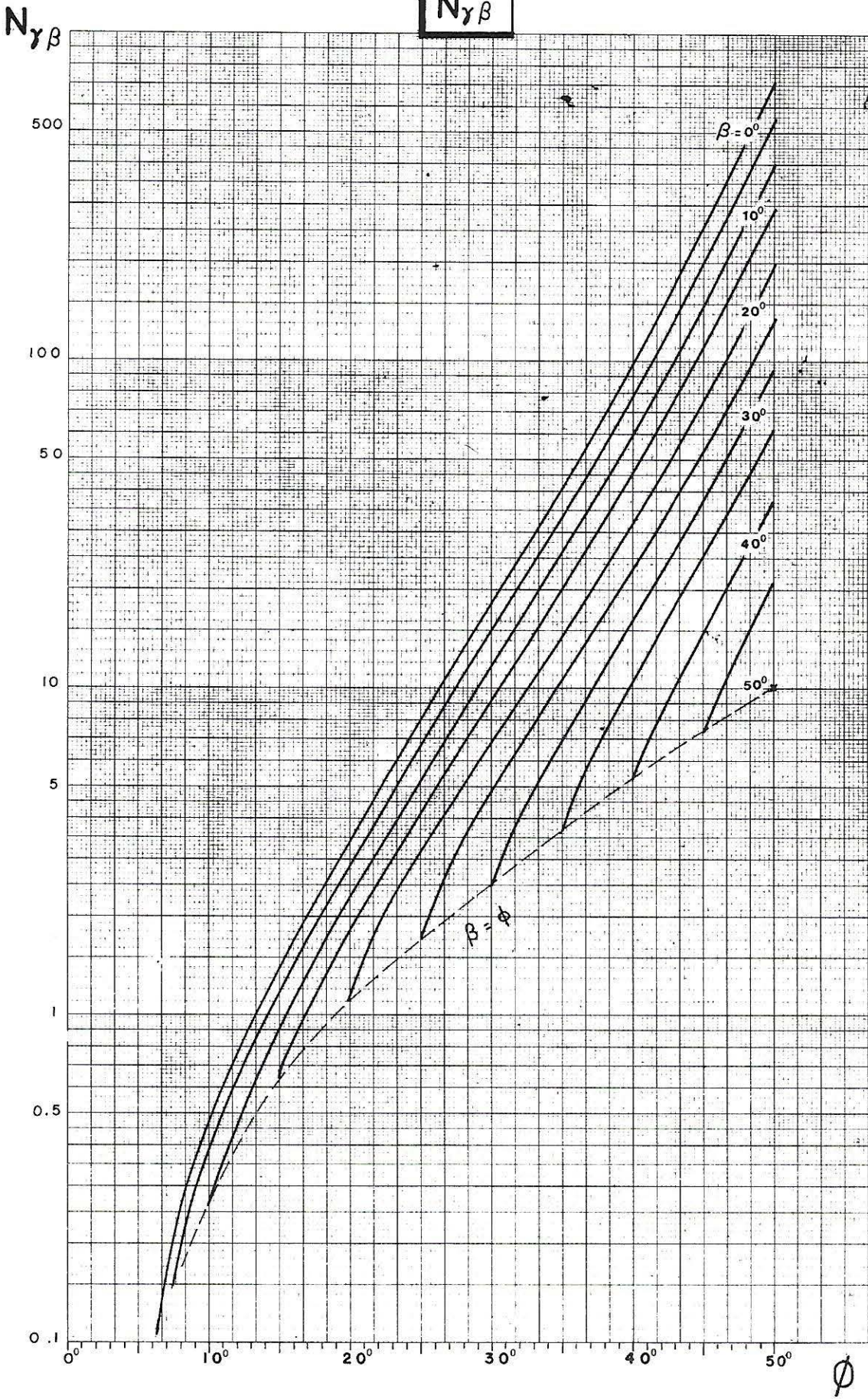
$$\delta_r / \beta = 1$$

N $q \beta$

$\beta \backslash \Phi$	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°	0°
0°	720	254	100	41.1	18.1	8.11	3.54	1.42	0.47	0.09	0
5°	550	193	75	32.6	14.1	6.4	3.0	1.15	0.38	0.02	
10°	400	142	58	25.6	11.2	5.15	2.35	0.87	0.27		
15°	281	107	43	19.6	8.9	4.1	1.8	0.65			
20°	200	76	32	14.8	6.8	3.15	1.13				
25°	139	55	23.5	10.6	4.8	1.6					
30°	95	38	16	7.1	2.4						
35°	61	25.4	10.3	3.6							
40°	37	14.5	5.2								
45°	21	7.2									
50°	10										
55°											
60°											
65°											
70°											
75°											
80°											
85°											
90°											

N_{γβ}

$N_{\gamma\beta}$



7-8

EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$$N_{c\beta} = \left(\frac{N_{q\beta}}{\cos \beta} - 1 \right) \cotg \phi$$

$$N_{q\beta} = \frac{\cos \beta (1 + \sin \phi)}{1 - \sin \phi \cos (\Gamma_0 - \delta_0)} \exp [(\pi + \delta_0 - \Gamma_0 - 2\beta) \operatorname{tg} \phi]$$

$$\text{avec : } \sin \Gamma_0 = \frac{\sin \delta_0}{\sin \phi}$$

$N_{\gamma\beta}$: pas d'expression analytique

$$N_{c\beta}^0 = \pi + 1 + \cos \omega_0 - \omega_0 - 2\beta \quad \text{avec : } \sin \omega_0 = \frac{\gamma D}{c} \cos \beta \sin \beta$$

7-8

BIBLIOGRAPHIE

Les résultats donnés ici proviennent des recherches théoriques et expérimentales effectuées en collaboration par Trân-Vô-Nhiêm et Giroud [1, 2, 3]

REFERENCES

- [1] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Contribution à l'étude de la force portante limite des fondations superficielles dans un milieu à deux dimensions : fondations à charge inclinée et excentrée et fondations sur talus", Thèse de Doctorat de Spécialité, Université de Grenoble (Décembre 1965), 100-137.
- [2] TRÂN-VÔ-NHIÊM et J.P. GIROUD, "Stabilité d'une fondation établie sur une pente", Le Comportement des Sols avant la Rupture, Journées nationales de mécanique des sols, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Numéro Spécial (Paris, 17-19 mai 1971), 138-145.
- [3] J.P. GIROUD et TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante d'une fondation sur une pente", Annales de l'I.T.B.T.P., 283-284, TMC 142 (Juillet-Août 1971), 129-180.

**FONDATION A BASE OBLIQUE
EXERÇANT UNE CHARGE NORMALE CENTRÉE**

(Fondation de mur de soutènement ou de massif d'appui)
sur un sol homogène horizontal

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est limité supérieurement par un plan horizontal. Il est supposé homogène sur une épaisseur infinie. En pratique, si la couche de sol repose sur une autre plus dure, son épaisseur H en dessous du point le plus bas de la base de la fondation doit être suffisante pour que les lignes de glissement puissent se développer. Une approximation par excès de cette épaisseur H s'obtient en faisant comme si la base de la fondation était horizontale (*)

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie. Sa base est rigide et a pour largeur constante B. Elle fait avec l'horizontale un angle ω . Son point le plus haut est situé à la profondeur D (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge normale centrée. La valeur limite (à la rupture du sol) de cette charge est désignée par $f_n \text{ lim}$ (force par unité de longueur). La pression limite ou pression portante est le quotient de cette charge limite par la largeur de la fondation :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = \frac{f_n \text{ lim}}{B} .$$

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(2) \quad p_{\text{lim}} = cN_{c\omega} + \gamma DN_{q\omega} + \frac{1}{2} \gamma BN_{\gamma\omega}$$

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

B : largeur de la base de la fondation

D : profondeur du point le plus haut de la base de la fondation

$N_{c\omega}$, $N_{q\omega}$ et $N_{\gamma\omega}$: coefficients sans dimensions dépendant de ϕ et ω

ϕ : angle de frottement interne du sol

ω : inclinaison sur l'horizontale de la base de la fondation.

(*) Voir la définition du sol dans la section intitulée "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

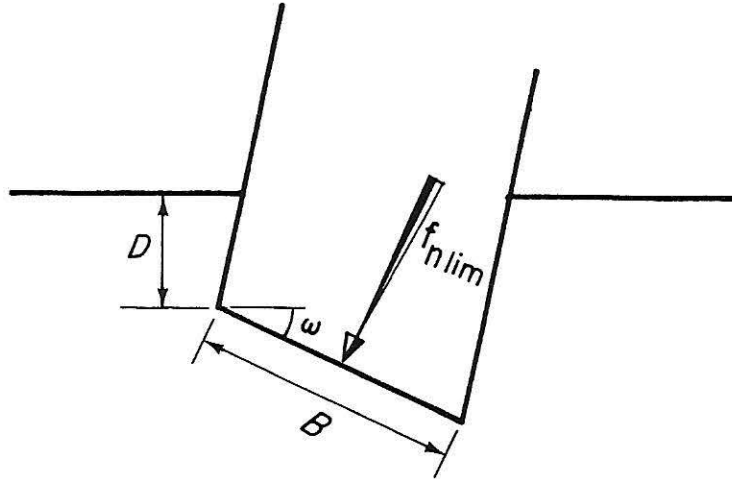


FIG. 1. — Définition du sol et de la charge. La charge est normale à la base et centrée. L'angle ω n'a pas de signe. La forme des parois de la fondation (notamment l'angle qu'elles font avec la base) n'a pas d'influence sur la valeur de la charge limite (du moins en première approximation).

7-9

Les valeurs numériques des coefficients $N_{c\omega}$, $N_{q\omega}$ et $N_{\gamma\omega}$ sont données sous forme de graphiques.

- Cas particulier : $\phi = 0^\circ$.

La formule (2) se simplifie et devient :

$$(3) \quad p_{\text{lim}} = cN_{c\omega}^0 + \gamma D + \frac{1}{2} \gamma B \sin \omega$$

avec :

$$\begin{aligned} N_{c\omega}^0 &= 5,14 \text{ pour } \omega = 0^\circ \\ &4,79 \text{ pour } \omega = 10^\circ \\ &4,44 \text{ pour } \omega = 20^\circ \\ &4,09 \text{ pour } \omega = 30^\circ. \end{aligned}$$

(On voit ci-dessus que $N_{c\omega}^0$ ne dépend que de ω , que $N_{q\omega}^0 = 1$ et que $N_{\gamma\omega}^0 = \sin \omega$.)

Exemple :

Considérons le massif d'appui défini sur la Fig. 2. Les propriétés du sol sont : $c = 0,1 \text{ bar}$ (210 lb/sq. ft), $\phi = 35^\circ$, $\gamma = 1,84 \text{ g/cm}^3$ (115 lb/cu. ft). Quelle est la pression limite ?

On note sur la figure que : $D = 1,2 \text{ m}$, $B = 1,8 \text{ m}$ et $\omega = 20^\circ$

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \gamma D &= 1\,840 \times 1,2 \times 9,81 \times 10^{-5} = 0,22 \text{ bar} \\ &= 115 \times 4 = 460 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= 0,5 \times 1\,840 \times 1,8 \times 9,81 \times 10^{-5} = 0,16 \text{ bar} \\ &= 0,5 \times 115 \times 6 = 345 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Pour $\omega = 20^\circ$ et $\phi = 35^\circ$, les graphiques donnent :

$$N_{c\omega} = 27,73 \quad N_{q\omega} = 20,42 \quad N_{\gamma\omega} = 22,0.$$

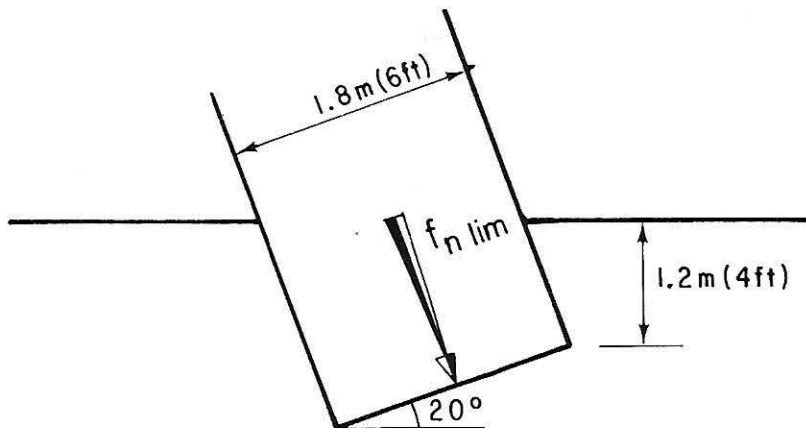


FIG. 2. — Définition du massif d'appui de l'exemple.

D'où :

$$\begin{aligned} P_{\text{lim}} &= 0,1 \times 27,73 + 0,22 \times 20,42 + 0,16 \times 22 = 10,8 \text{ bars} \\ &= 210 \times 27,73 + 460 \times 20,42 + 345 \times 22 = 22\,800 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Si, au contraire, la base de l'appui était horizontale (Fig. 3) à la profondeur $D = 1,5 \text{ m}$ égale à celle du milieu de la base oblique, sa force portante se calculerait à l'aide des formules indiquées dans une autre section (*). Les coefficients

(*) Voir la section intitulée "Fondation à base horizontale exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol horizontal homogène" (Section 8-1).

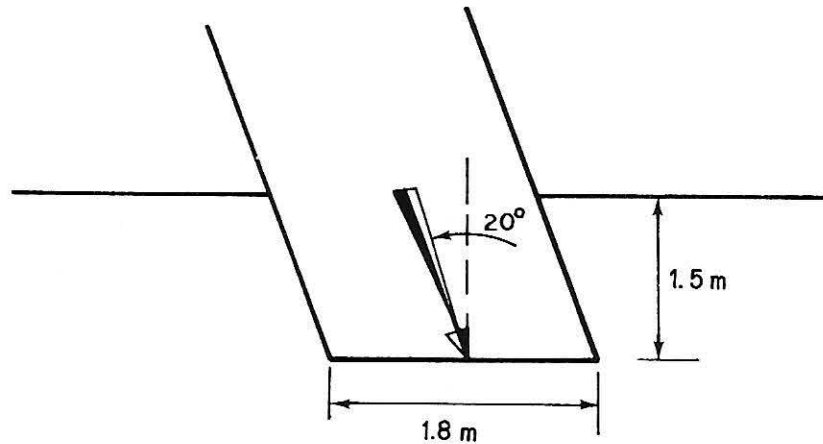


FIG. 3. — Appui à base horizontale dont la pression limite est comparée à celle de l'appui à base oblique de la Fig. 2.

de force portante seraient alors :

$$N_{c\delta} = 18,47 \quad N_{q\delta} = 13,94 \quad N_{\gamma\delta} = 8,80.$$

Sur ce dernier coefficient il faudrait appliquer un coefficient réducteur de 0,98. On aurait alors, pour la pression limite :

$$P_{lim} = 6,3 \text{ bars.}$$

Donc, pour une inclinaison donnée de la charge, une fondation dont la base est normale à la charge est nettement plus stable qu'une fondation à base horizontale.

TABLES ET GRAPHIQUES

$N_{q\omega}$	p. 242-243
$N_{c\omega}$	p. 242-243
$N_{\gamma\omega}$	p. 244-245

N_q ω

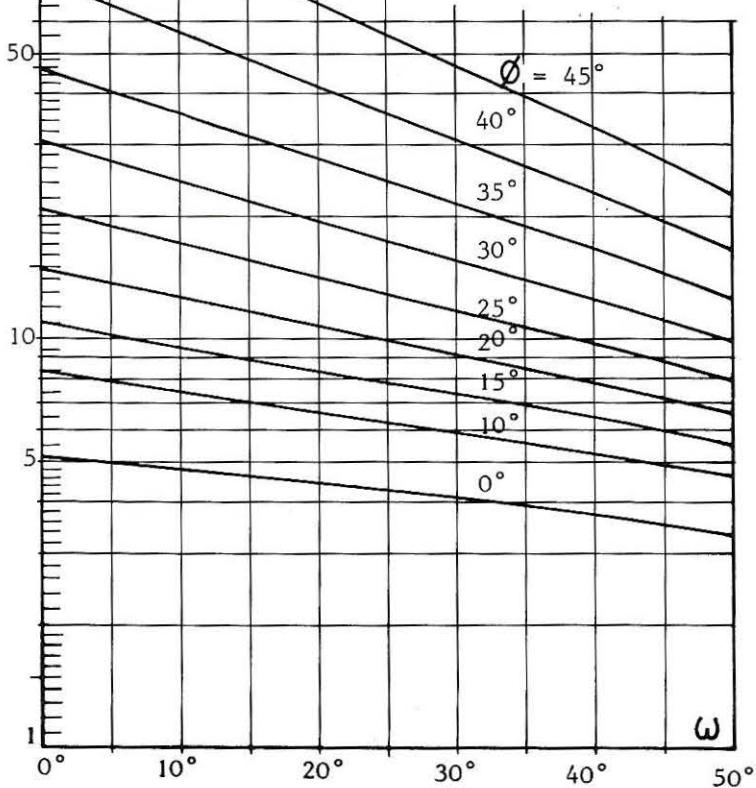
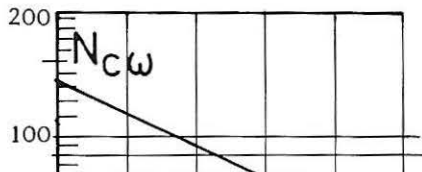
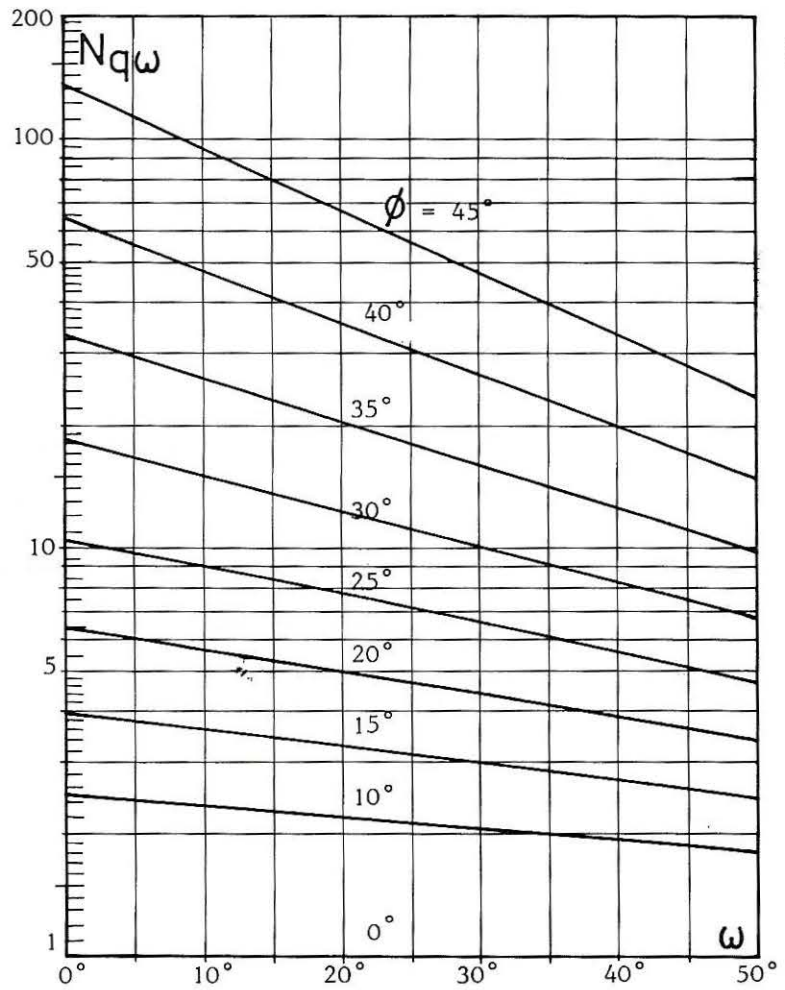
$\omega \backslash \phi$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0°	1.57	2.47	3.94	6.40	10.66	18.40	33.29	64.19	134.8
10°	1.52	2.32	3.59	5.64	9.06	15.04	26.07	47.89	95.13
20°	1.47	2.19	3.27	4.96	7.70	12.29	20.42	35.73	67.10
30°	1.43	2.05	2.98	4.37	6.54	10.05	15.99	26.66	47.33
40°	1.39	1.93	2.71	3.85	5.56	8.22	12.52	19.89	33.38
50°	1.35	1.82	2.47	3.39	4.72	6.72	9.81	14.84	23.55

7-9

N_c ω

$\omega \backslash \phi$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0°	6.49	8.34	10.97	14.83	20.72	30.14	46.12	75.31	133.8
10°	5.95	7.51	9.66	12.73	17.28	24.32	35.81	55.88	94.13
20°	5.43	6.72	8.47	10.89	14.36	19.56	27.73	41.39	66.10
30°	4.92	5.98	7.38	9.26	11.88	15.68	21.41	30.58	46.58
40°	4.43	5.29	6.39	7.83	9.78	12.50	16.46	22.51	32.38
50°	3.95	4.63	5.48	6.57	7.99	9.90	12.58	16.49	22.54

N_{qω}

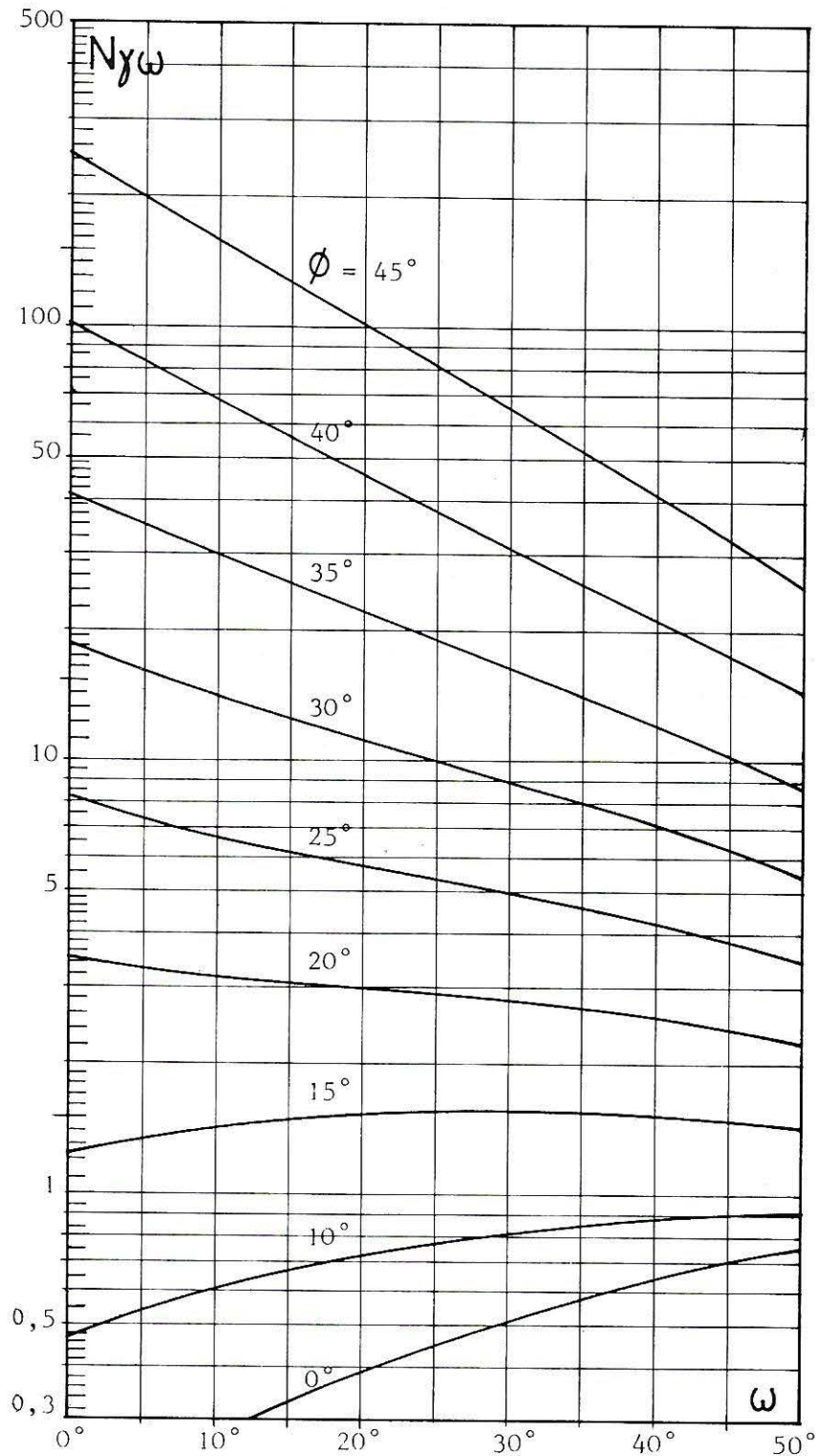


N_{cω}

7-9

$N_{\gamma\omega}$

$\omega \backslash \phi$	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0°	0.46	1.40	3.54	8.20	18.4	41.0	100	250
10°	0.61	1.42	3.16	6.64	14.1	30.0	68	170
20°	0.73	1.52	3.00	5.78	11.3	22.0	45	92.5
30°	0.81	1.52	2.80	4.94	9.00	16.3	31	65
40°	0.88	1.50	2.55	4.20	7.10	12.2	21.5	41
50°	0.91	1.45	2.25	3.44	5.50	8.70	14.5	25



7-9

EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$$N_{q\omega} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \exp[(\pi - 2\omega) \operatorname{tg} \phi]$$

$$N_{c\omega} = (N_{q\omega} - 1) \operatorname{cotg} \phi$$

$N_{\gamma\omega}$ n'a pas d'expression analytique

$$N_{c\omega}^0 = \pi + 2 - 2\omega.$$

BIBLIOGRAPHIE

Les résultats de cette section ont été établis par Trân-Vô-Nhiêm [1].

REFERENCE

- [1] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble (Février 1971), 193-194.

CHARGE INCLINÉE ET EXCENTRÉE

Fondation à base horizontale

- sol *homogène* horizontal Section 8-1
- sol homogène horizontal mais de *niveau différent* de part et d'autre de la fondation Section 8-2
- sol homogène *en pente* Section 8-3

Fondation à base oblique

- sol *homogène* horizontal Section 8-4

8-1

8-2

8-3

8-4

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE INCLINÉE ET EXCENTRÉE**

(Semelle, Radier, Fondation de mur de soutènement)
sur un sol horizontal homogène

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est limité supérieurement par un plan horizontal. Il est supposé homogène sur une épaisseur infinie. En pratique, si la couche de sol repose sur une autre plus dure, son épaisseur H en dessous de la base de la fondation doit être suffisante pour que les lignes de glissement puissent se développer. On pourra se reporter au cas de la charge verticale centrée (*) pour avoir une estimation de l'épaisseur minimale H.

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie et de largeur constante B (Fig. 1). Sa base est rigide et elle est située à la profondeur D. Elle exerce sur le sol une charge inclinée d'un angle δ . La valeur limite (à la rupture) de cette charge est désignée par f_{lim} (force par unité de longueur). La pression limite ou pression portante est le quotient de la composante verticale de la charge limite par la largeur de la fondation :

$$(1) \quad p_{lim} = \frac{f_{lim} \cos \delta}{B} = \frac{f_n \lim}{B}$$

L'angle δ n'est pas orienté et par conséquent il n'a pas de signe. L'inclinaison fictive δ^\bullet est définie par (**) :

$$(2) \quad \delta^\bullet = \text{Arc tg} \frac{p_{lim} \text{tg} \delta}{p_{lim} + c \cotg \phi}$$

avec :

δ^\bullet : inclinaison fictive de la charge dans le cas d'un sol cohérent

δ : inclinaison réelle de la charge

p_{lim} : pression limite

c : cohésion du sol

ϕ : angle de frottement interne du sol.

(*) Voir la définition du sol dans la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

(**) En toute rigueur, il faudrait faire intervenir les coefficients de réduction r_{cq} et r_γ définis plus loin. Mais ceci compliquerait considérablement la formule (2) pour un gain de précision négligeable.

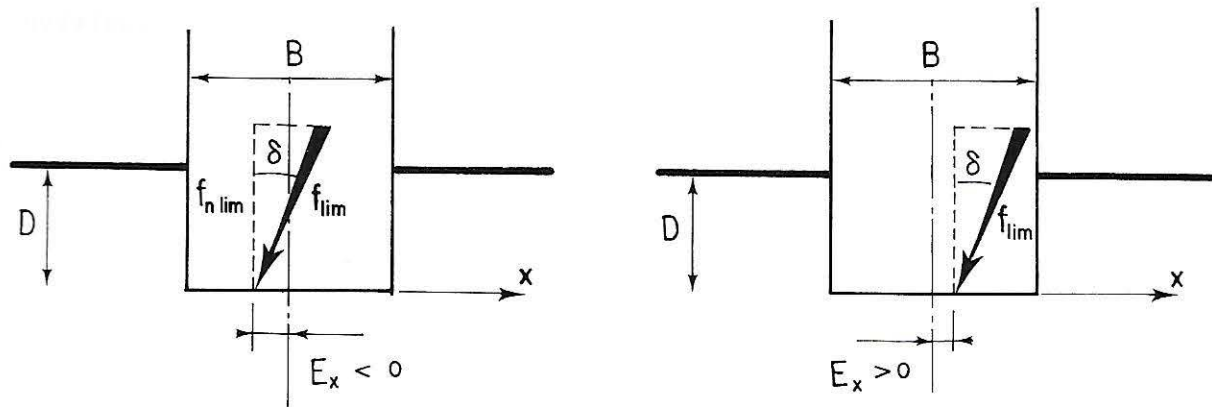


FIG. 1. — Définition de la fondation à charge inclinée et excentrée et illustration des deux cas possibles. Par convention, l'axe Ox est orienté dans le sens opposé à la composante tangentielle de la charge. Si celle-ci était inclinée à gauche, on aurait des dessins symétriques de ceux donnés ci-dessus avec l'axe Ox dirigé vers la gauche. Ces deux cas n'ont pas été dessinés car ils sont identiques à ceux figurés ci-dessus.

Une excellente approximation de (2) est donnée par :

$$(3) \quad \delta^\circ \approx \frac{\delta}{1 + \frac{c \cotg \phi \cos \delta}{P_{lim}}}$$

Comme l'angle δ , l'angle δ° n'a pas de signe. L'inclinaison fictive doit respecter la condition suivante :

$$(4) \quad \delta^\circ \leq \phi.$$

Si la cohésion est nulle ($c = 0$), l'inclinaison fictive est égale à l'inclinaison réelle :

$$(5) \quad \delta^\circ = \delta.$$

Le point d'application de la charge se trouve à une distance E_x de l'axe de la fondation (Fig. 1). Le signe de E_x est donné par l'axe Ox , qui, par convention, est orienté du côté opposé à celui de la composante horizontale de la charge. On définit l'excentricité de la charge par :

$$(6) \quad e_x = E_x/B.$$

L'excentricité e_x a le même signe que E_x . Elle peut donc être positive ou négative :

$$(7) \quad -0,5 \leq e_x \leq 0,5.$$

Les deux cas de signe sont illustrés par la Fig. 1.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(8) \quad P_{lim} = cr_{cq} N_{c\delta} + \gamma Dr_{cq} N_{q\delta} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\delta}$$

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

B : largeur de la fondation

D : profondeur de la base de la fondation

r_{cq} et r_{γ} : coefficients de réduction définis par (9) et (10)

$N_{c\delta}$, $N_{q\delta}$, $N_{\gamma\delta}$: coefficients sans dimensions dépendant de ϕ et de δ^{\bullet}

ϕ : angle de frottement interne du sol

δ^{\bullet} : inclinaison fictive définie par (2) et (3).

Les coefficients de réduction r_{cq} et r_{γ} sont compris entre 0 et 1. Ils sont donnés par les formules suivantes :

$$(9) \quad r_{cq} = 1 - 2|e_x|$$

$$(10) \quad r_{\gamma} = \left(\frac{1 \pm 2 e_x}{1 \pm 2 e_{opt}} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \text{signe +} \quad \text{si } e_{opt} > e_x \\ \text{signe -} \quad \text{si } e_{opt} < e_x \end{array}$$

e_x et e_{opt} étant algébriques (*) (positifs ou négatifs) et e_x étant défini par (6).

Les valeurs numériques de e_{opt} , excentricité optimale, pour laquelle $r_{\gamma} = 1$, sont données dans une table et deux graphiques.

(*) On remarque sur le graphique que e_{opt} est presque toujours positif.

Les valeurs numériques des coefficients $N_{c\delta}$, $N_{q\delta}$ et $N_{\gamma\delta}$ sont données sous forme de tables et de graphiques en fonction de ϕ et de δ^\bullet . Plusieurs cas sont à considérer :

- Cas général ($c \neq 0$, $\phi \neq 0$) :

On voit d'après les formules (2) ou (3) que δ^\bullet dépend de p_{lim} que l'on cherche. Il faudra donc procéder par approximations successives, en remarquant, pour démarrer, que δ^\bullet est inférieur à δ . On obtient alors une valeur par défaut de la pression limite si l'on fait un premier calcul en remplaçant δ^\bullet par δ (notons que cette approximation est d'autant meilleure que δ est faible et qu'elle est impossible si δ est supérieur à ϕ).

- Cas du sol sans cohésion ($c = 0$) :

On a alors $\delta^\bullet = \delta$. Le calcul est direct (sans approximations successives).

- Cas du sol sans frottement ($\phi = 0$) :

On a alors :

$$(11) \quad N_{\gamma\delta} = 0 \quad N_{q\delta} = 1.$$

et il est préférable de grouper les deux coefficients $N_{c\delta}$ et $N_{q\delta}$ en un seul appelé $N_{cq\delta}^0$:

$$(12) \quad p_{lim} = (1 - 2 |e_x|) c N_{cq\delta}^0.$$

Les valeurs numériques de $N_{cq\delta}^0$ sont données dans une table et un graphique (en fonction de l'inclinaison réelle δ). Notons que :

$$(13) \quad N_{cq\delta}^0 \leq 1/\text{tg } \delta.$$

- Cas de la charge normale excentrée ($\delta = 0$) :

La formule (8) devient alors :

$$(14) \quad p_{lim} = cr_{cq} N_c + \gamma Dr_{cq} N_q + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma}.$$

Les trois coefficients N_c , N_q et N_{γ} sont ceux relatifs à la charge normale centrée. On trouve leurs valeurs numériques en se reportant à la section donnant

la force portante d'une fondation exerçant une charge verticale centrée (*) ou bien dans les tables et graphiques ci-après pour $\delta^{\bullet} = 0$.

- Cas de la charge inclinée centrée ($e_x = 0$) :

Les coefficients de réduction se simplifient :

$$(15) \quad r_{cq} = 1$$

$$(16) \quad r_{\gamma} = 1 / (1 + 2 |e_{opt}|)^2$$

et la pression limite est donnée par :

$$(17) \quad P_{lim} = cN_{c\delta} + \gamma DN_{q\delta} + \frac{1}{2} \gamma B r_{\gamma} N_{\gamma\delta}$$

Exemple 1 :

Considérons une pile intermédiaire d'un ouvrage d'art franchissant une autoroute (Fig. 2). Cette pile est fondée sur une semelle de largeur $B = 3 \text{ m}$ (10 ft), de longueur $L = 4 \text{ m}$ (13 ft) établie à la profondeur $D = 1,3 \text{ m}$ (4,25 ft) sur un sol

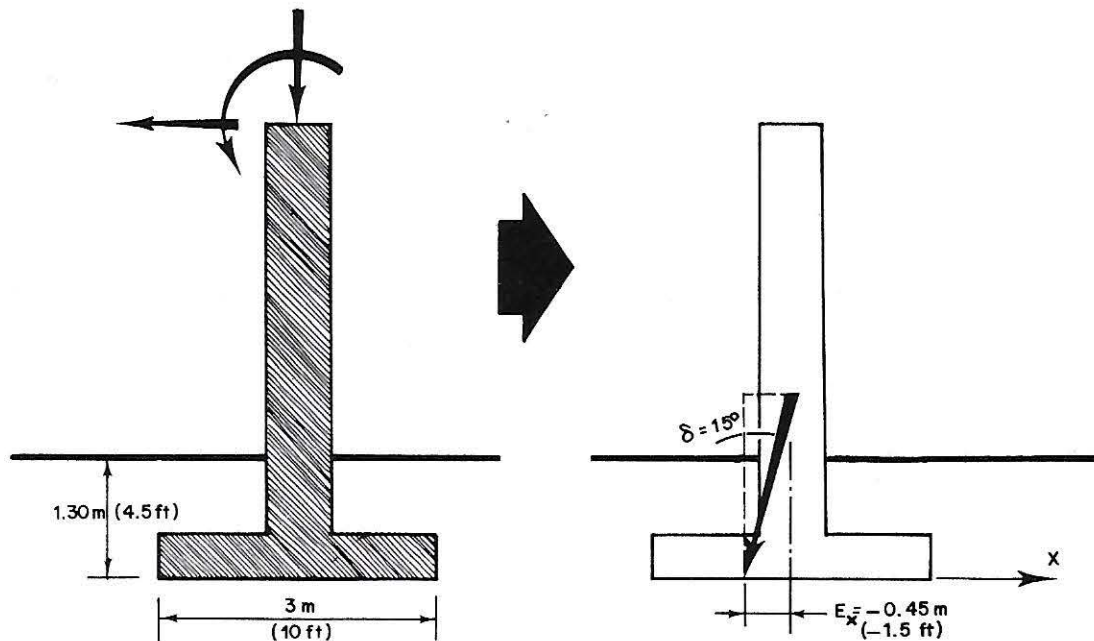


FIG. 2. — Définition de la pile de pont de l'exemple 1.

(*) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

dont les caractéristiques mécaniques sont : poids volumique, $\gamma = 1,8 \text{ t/m}^3$ (112 lb/cu. ft), angle de frottement, $\phi = 30^\circ$, et cohésion, $c = 0,3 \text{ bar} = 0,03 \text{ mégapascal}$ (3 t/m²) (625 lb/sq. ft). Après réduction des efforts exercés en tête de la pile et compte tenu des poids propres de cette pile et de la semelle, le sol est soumis à une charge inclinée de $\delta = 15^\circ$ et dont le point d'application est situé à une distance $E_x = -0,45 \text{ m}$ (1,5 ft) de l'axe de la semelle (le signe moins étant dû au sens de l'axe Ox orienté conformément à la convention indiquée sur la figure 1). Quelle est la valeur admissible de la charge verticale $F_n \text{ lim}$?

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= 0,5 \times 1,8 \times 3 = 2,7 \text{ t/m}^2 \\ &= 0,5 \times 1\ 800 \times 9,81 \times 3 = 26\ 500 \text{ pascals} = 0,265 \text{ bar} = 0,026 \text{ mégapascal} \\ &= 0,5 \times 112 \times 10 = 560 \text{ lb/sq. ft} \\ \gamma D &= 1,8 \times 1,3 = 2,34 \text{ t/m}^2 \\ &= 1\ 800 \times 9,81 \times 1,3 = 23\ 000 \text{ pascals} = 0,23 \text{ bar} = 0,023 \text{ mégapascal} \\ &= 112 \times 4,25 = 475 \text{ lb/sq. ft} \\ e_x &= -0,45/3 = -1,5/10 = -0,15. \end{aligned}$$

Le sol ayant de la cohésion, les valeurs des coefficients $N_{c\delta}$, $N_{q\delta}$ et $N_{\gamma\delta}$ sont données en fonction de l'inclinaison fictive δ^\bullet . Mais, comme il faut connaître P_{lim} (c'est-à-dire le résultat du calcul) pour déduire δ^\bullet de l'inclinaison réelle δ , on supposera, en première approximation, que $\delta^\bullet = \delta = 15^\circ$. On lit alors dans les tables pour $\phi = 30^\circ$ et $\delta^\bullet = 15^\circ$:

$$\begin{aligned} N_{c\delta} &= 16,23 & N_{q\delta} &= 10,37 \\ N_{\gamma\delta} &= 6,50 & e_{\text{opt}} &= +0,012. \end{aligned}$$

Les coefficients de réduction seront :

$$\begin{aligned} r_{cq} &= 1 - 2 \times 0,15 = 0,7 \\ r_\gamma &= \left[\frac{1 + 2(-0,15)}{1 + 2(0,012)} \right]^2 = 0,465. \end{aligned}$$

On peut alors, à l'aide de la formule (8), calculer une première valeur approchée de la pression limite :

$$\begin{aligned} P_{\text{lim}} &= 3 \times 0,7 \times 16,23 + 2,34 \times 0,7 \times 10,37 + 2,7 \times 0,465 \times 6,50 \\ &= 34 + 17 + 8,15 = 59,15 \text{ t/m}^2 \\ &= 0,3 \times 0,7 \times 16,23 + 0,23 \times 0,7 \times 10,37 + 0,265 \times 0,465 \times 6,50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 3,4 + 1,7 + 0,8 = 5,9 \text{ bars} = 0,59 \text{ mégapascal} \\
 &= 625 \times 0,7 \times 16,23 + 475 \times 0,7 \times 10,37 + 560 \times 0,465 \times 6,50 \\
 &= 7\ 100 = 3\ 450 + 1\ 700 = 12\ 250 \text{ lb/sq. ft.}
 \end{aligned}$$

A l'aide de cette valeur approchée de p_{lim} on peut maintenant calculer δ^{\bullet} à l'aide de (2) :

$$\text{tg } \delta^{\bullet} = \frac{5,9 \times 0,268}{5,9 + 0,3 \times 1,73} = \frac{12\ 250 \times 0,268}{12\ 250 + 625 \times 1,73} = 0,248$$

d'où $\delta^0 = 14^{\circ}$.

Cette valeur de δ^{\bullet} est peu différente de 15° et le gain de précision que l'on aurait en refaisant le calcul serait négligeable (*). On retiendra donc pour pression limite la valeur calculée plus haut.

Enfin, si nous admettons que le calcul précédent est valable pour une fondation rectangulaire (**), on obtient la force portante, $F_{\text{n lim}}$, en multipliant la pression limite par la surface de la semelle :

$$\begin{aligned}
 F_{\text{n lim}} &= p_{\text{lim}} \text{ LB} \\
 &= 59 \times 3 \times 4 = 710 \text{ tonnes} \\
 &= 0,59 \times 10^6 \times 3 \times 4 = 7\ 100\ 000 \text{ newtons} \\
 &= 7\ 100 \text{ kilonewtons} \\
 &= 12\ 250 \times 13 \times 10 = 1\ 590\ 000 \text{ lb.}
 \end{aligned}$$

Pour avoir la valeur admissible de la force portante, il suffit de diviser la valeur que l'on vient de calculer pour $F_{\text{n lim}}$ par un coefficient de sécurité (3, par exemple).

Exemple 2 :

Quelle est la pression limite d'une semelle filante exerçant une charge centrée inclinée de 10° sur une argile saturée : $\phi = 0$, $c = 0,5 \text{ bar}$ (1 045 lb/sq. ft), $\gamma = 1,82 \text{ g/cm}^3$ (114 lb/cu. ft) à la profondeur $D = 1,4 \text{ m}$ (4,5 ft) ?

La pression limite est donnée par la formule (14) avec $e_x = 0$. Calculons :

$$\begin{aligned}
 \frac{\gamma D}{c} &= \frac{1\ 820 \times 9,81 \times 1,4 \times 10^{-5}}{0,5} = 0,5 \\
 &= \frac{114 \times 4,5}{1\ 045} = 0,5.
 \end{aligned}$$

(*) Il faut cependant noter que la convergence des approximations successives n'est pas toujours aussi rapide que dans cet exemple.

(**) Voir l'introduction de ce volume § 1a.

Le graphique donne pour $\delta = 10^\circ$ et $\gamma D/c = 0,5$

$$N_{cq\delta}^0 = 4,35$$

d'où :

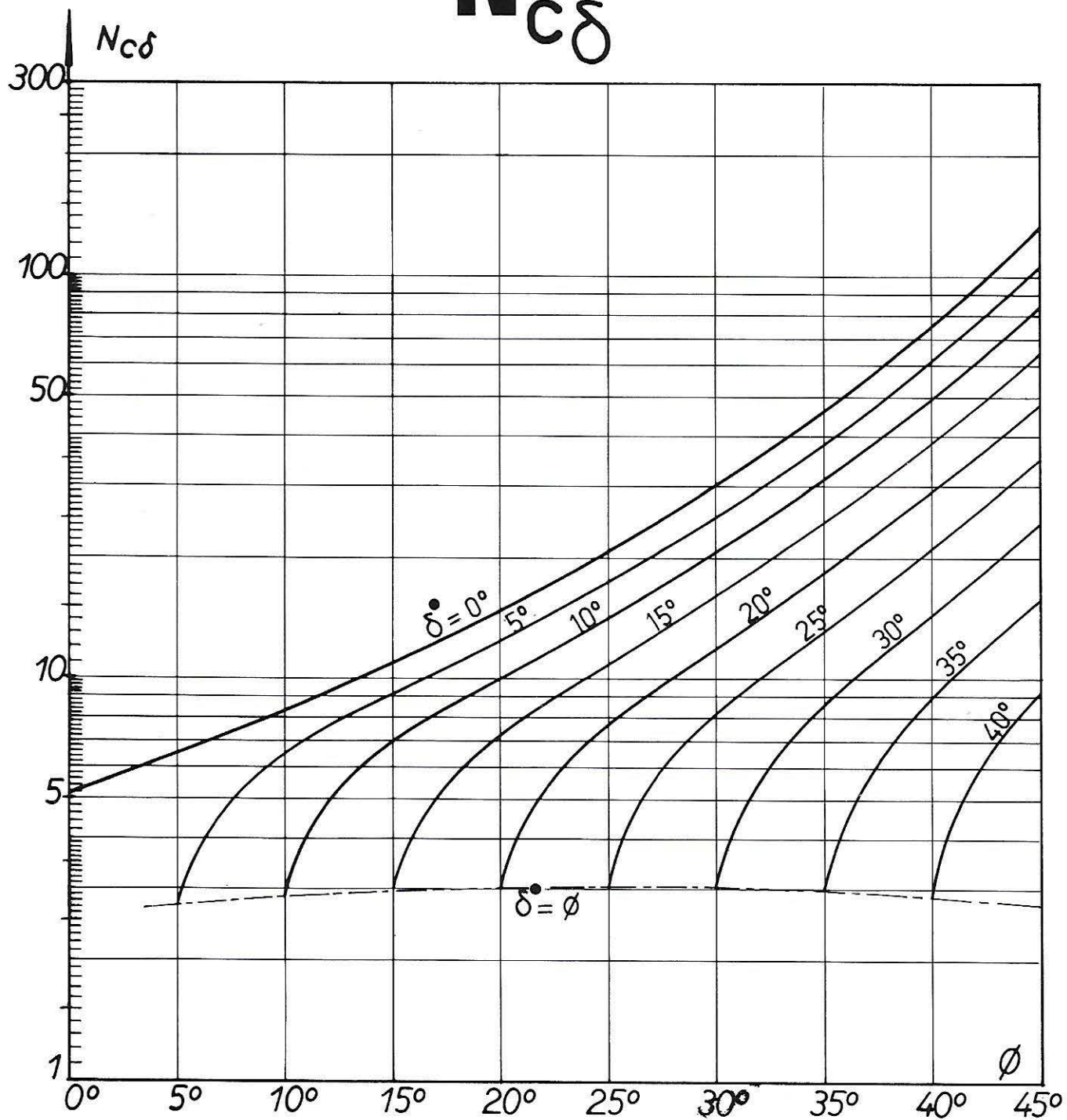
$$P_{lim} = 0,5 \times 4,35 = 2,2 \text{ bars}$$

$$= 1\,045 \times 4,35 = 4\,500 \text{ lb/sq. ft.}$$

TABLES ET GRAPHIQUES

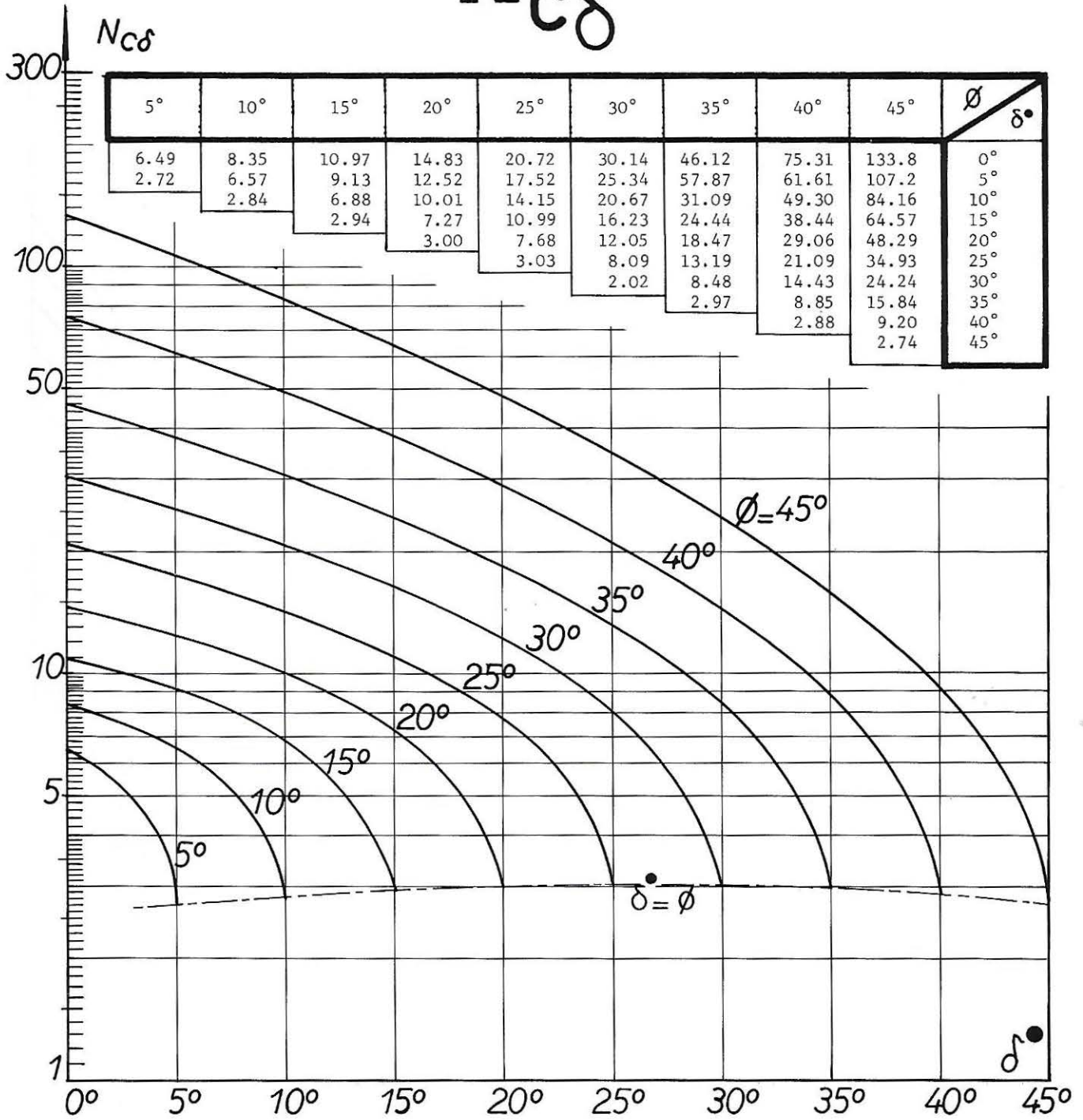
$N_{c\delta}$	p. 258-259
$N_{q\delta}$	p. 260-261
$N_{\gamma\delta}$	p. 262-263
e_{opt}	p. 264-265
$N_{cq\delta}^0$	p. 266-267

$N_{c\delta}$

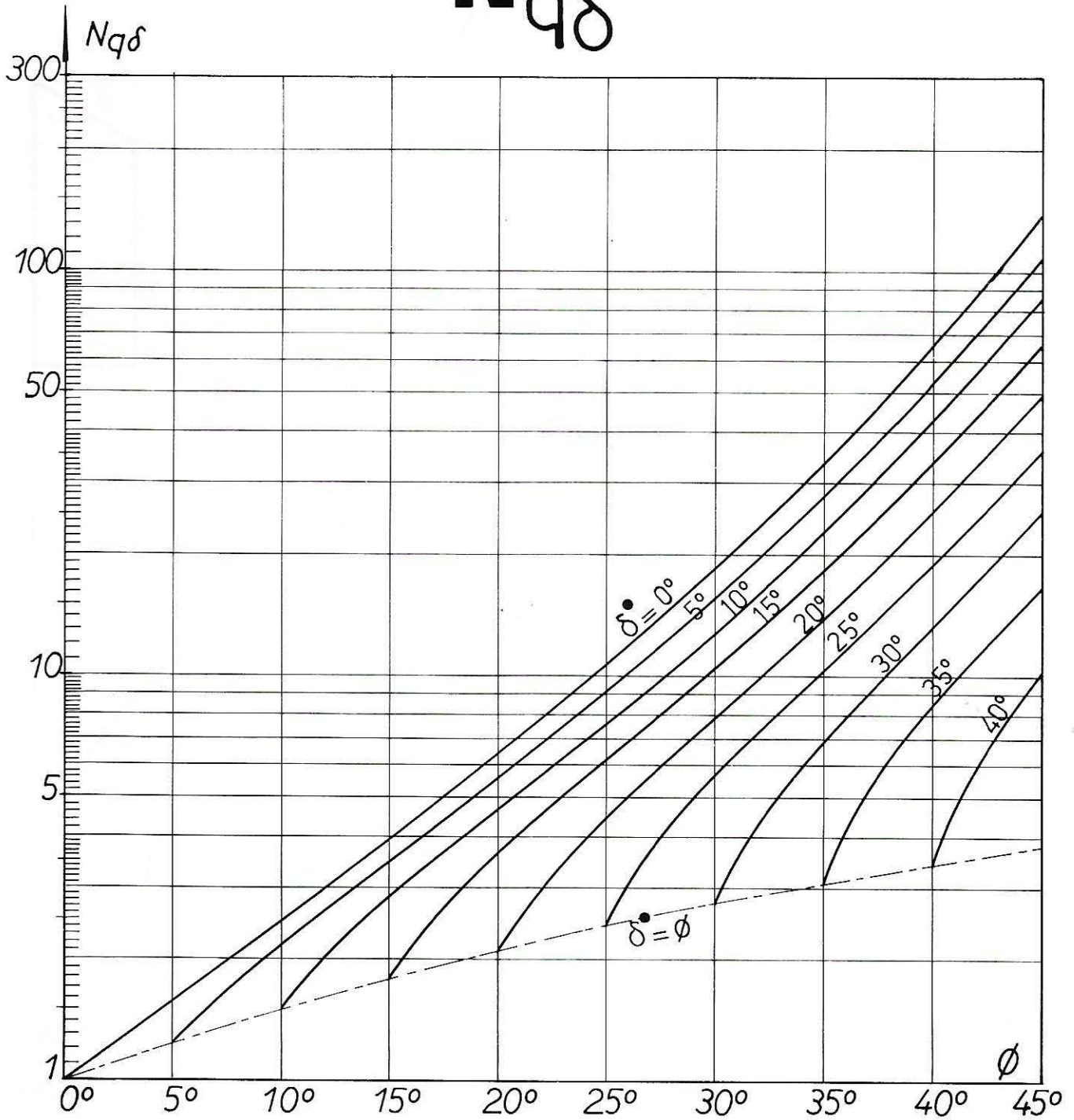


-1

$N_{c\delta}$

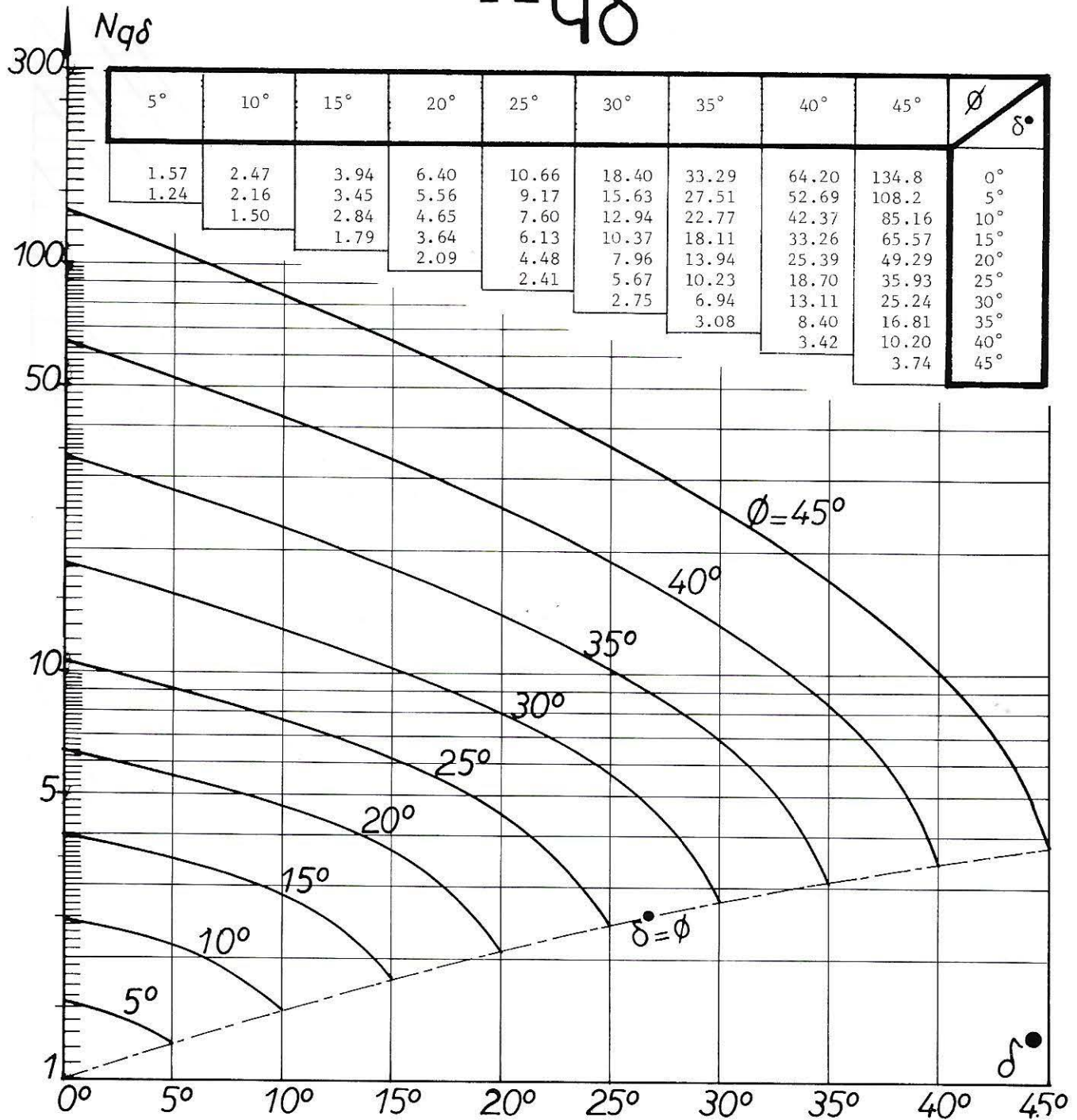


$N_{q\delta}$



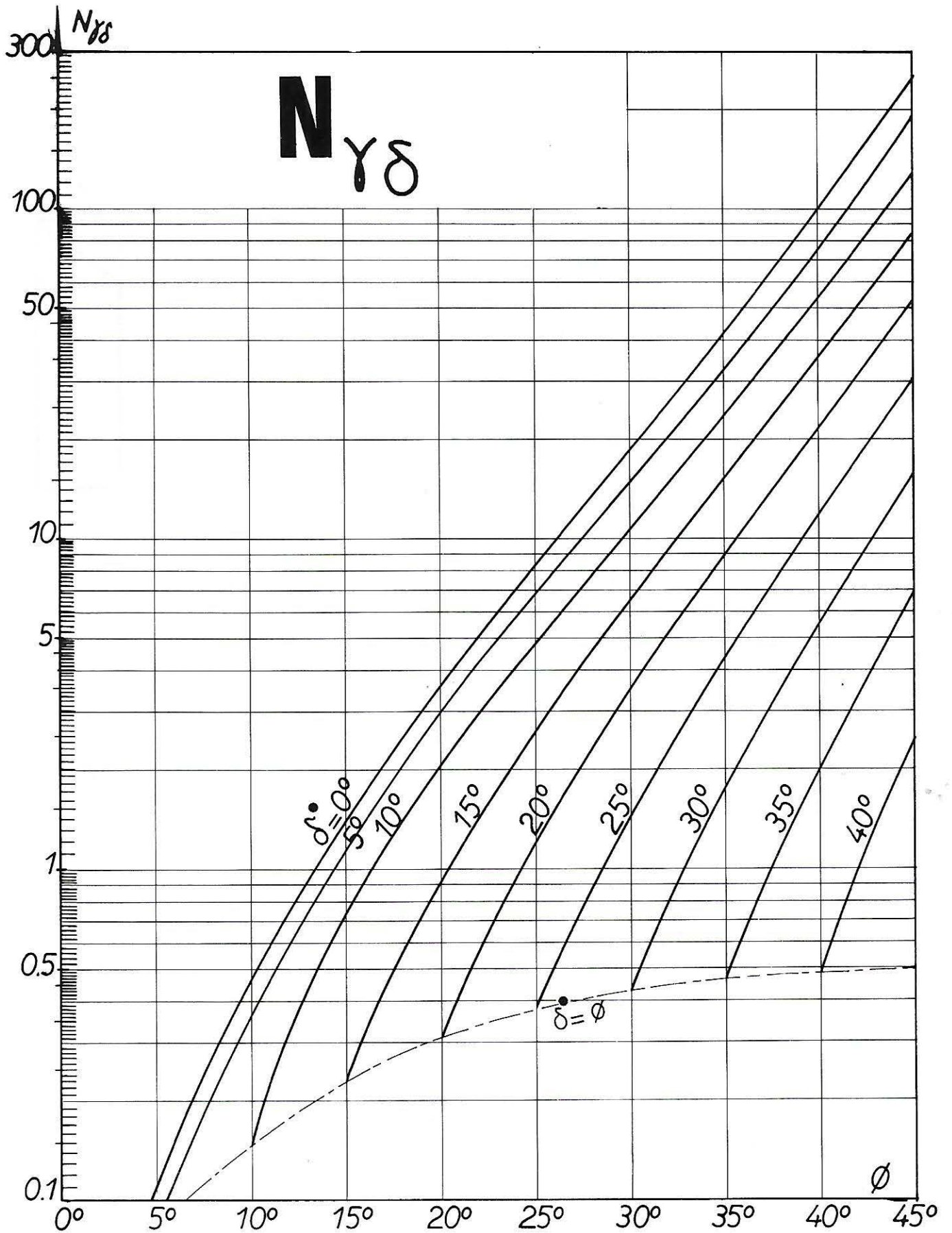
-1

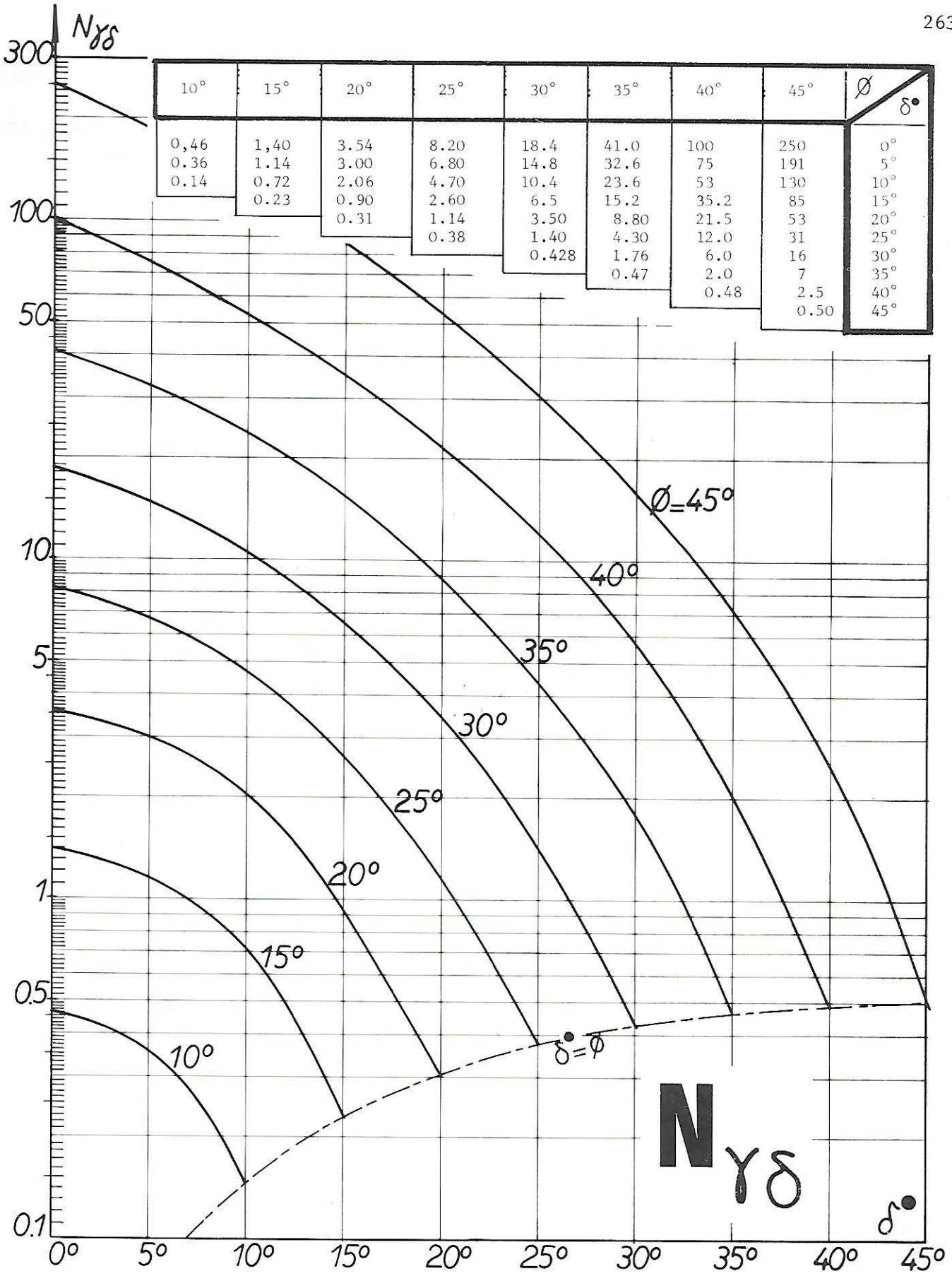
N_{qδ}



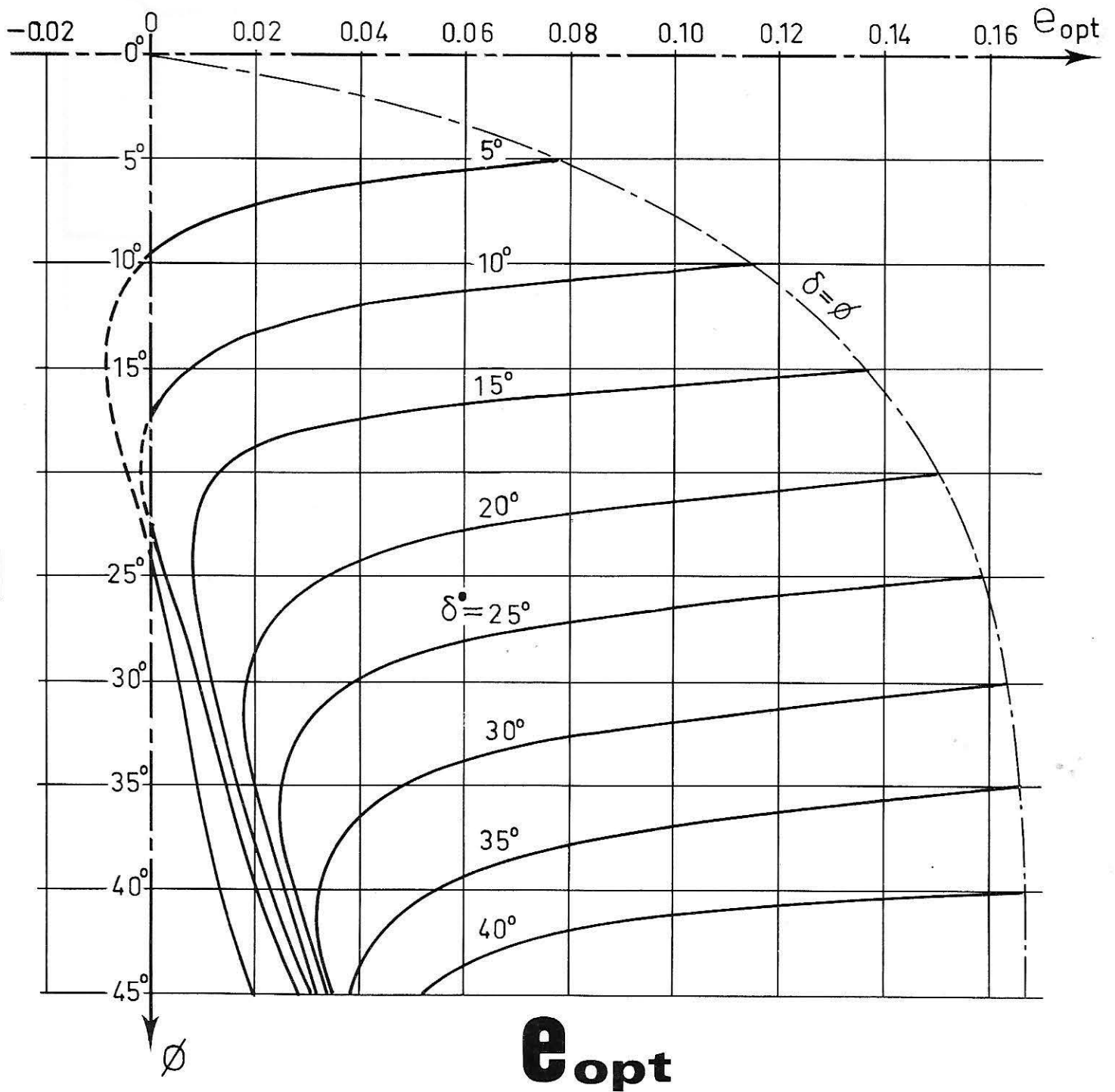
8-1

8-1



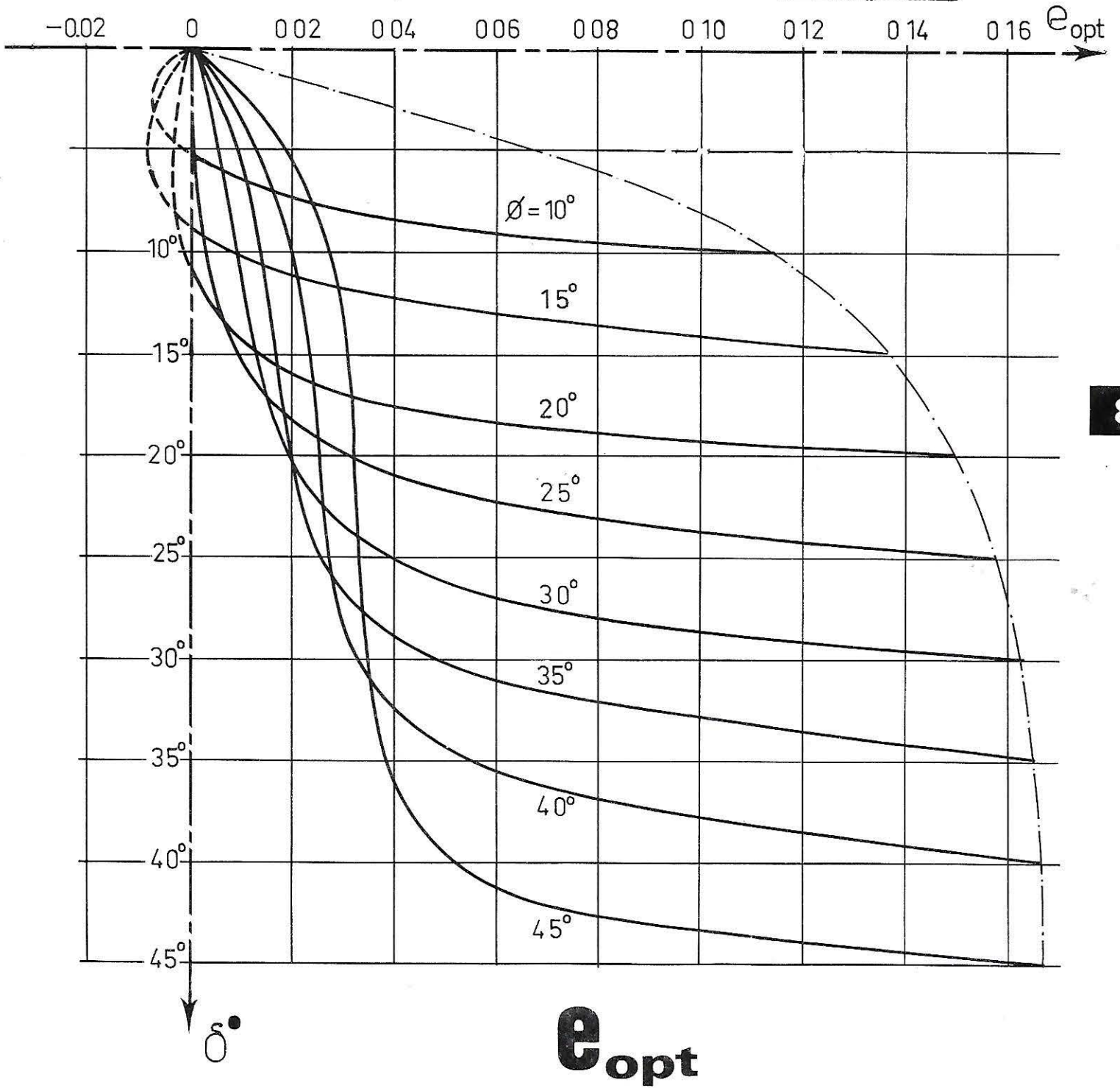


8-1



8-1

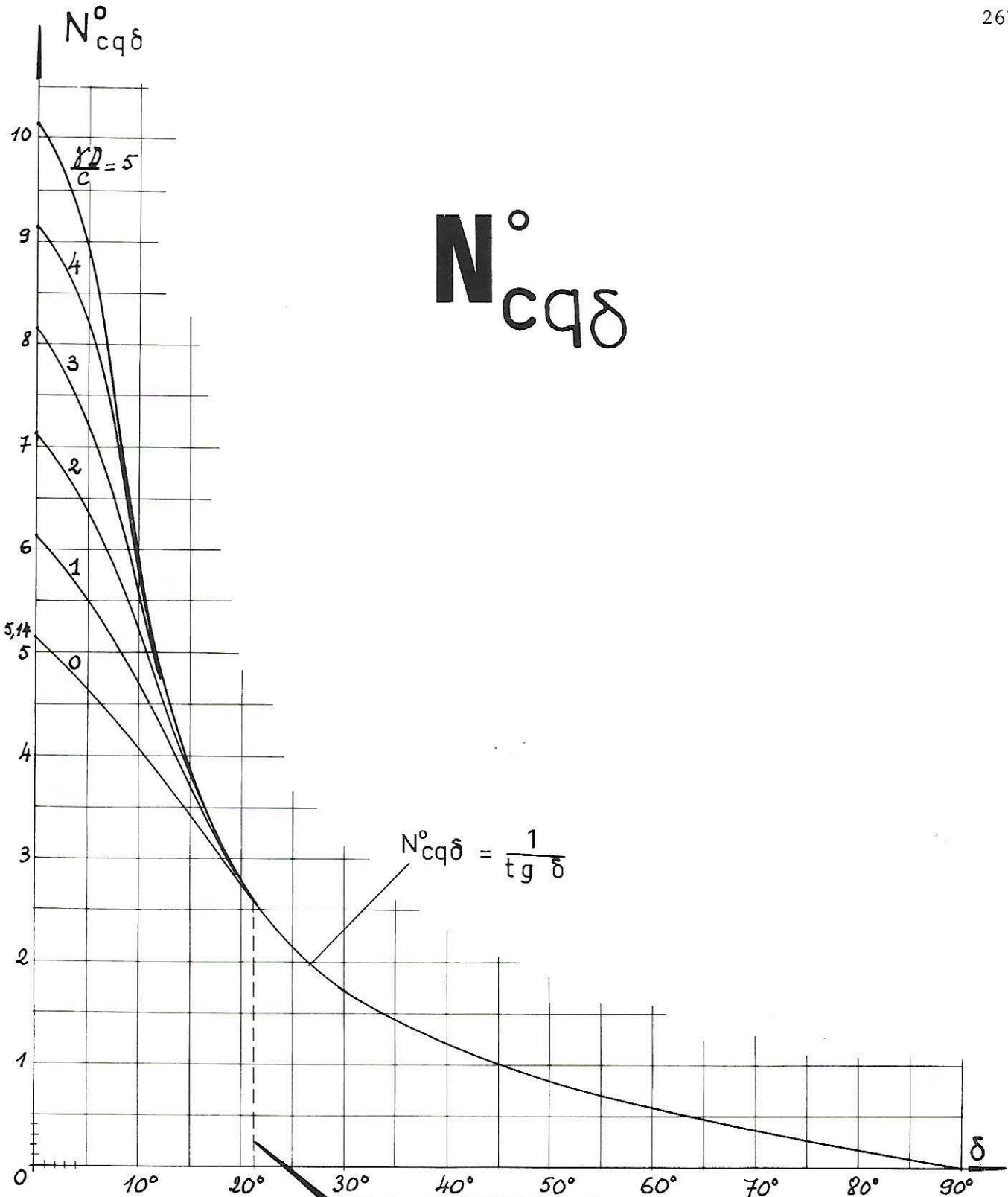
10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	δ°
0 0.000 0.115	0 0.000 0.006 0.137	0 0.000 0.000 0.012 0.150	0 0.001 0.003 0.009 0.032 0.158	0 0.005 0.009 0.012 0.019 0.039 0.163	0 0.009 0.014 0.017 0.02 0.025 0.047 0.165	0 0.013 0.020 0.023 0.025 0.027 0.032 0.055 0.167	0 0.019 0.027 0.031 0.032 0.033 0.035 0.038 0.051 0.167	0° 5° 10° 15° 20° 25° 30° 35° 40° 45°



8-1

$N_{c\gamma\delta}$

$\frac{\gamma D}{c}$	δ									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0	5.14	4.63	4.04	3.40	2.57	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
1	6.14	5.51	4.71	3.71	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
2	7.14	6.37	5.29	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
3	8.14	7.23	5.65	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
4	9.14	8.06	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
5	10.14	8.88	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
6	11.14	9.66	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00



$N_{cq\delta}^{\circ}$

$N_{cq\delta}^{\circ} = \frac{1}{\text{tg } \delta}$

$21^{\circ}15' = \text{Arctg } \frac{1}{\frac{\pi}{2} + 1}$

8-1

EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$$N_{q\delta} = \frac{\cos \delta^\bullet + \sin \phi \cos \Gamma}{1 - \sin \phi} \cos \delta^\bullet \exp[(\pi - \delta^\bullet - \Gamma) \operatorname{tg} \phi]$$

avec : $\Gamma = \operatorname{Arc} \sin \frac{\sin \delta^\bullet}{\sin \phi}$.

$$N_{c\delta} = (N_{q\delta} - 1) \operatorname{cotg} \phi.$$

$N_{\gamma\delta}$ n'a pas d'expression analytique.

Expression de $N_{cq\delta}^0$:

$$a) N_{cq\delta}^0 = X \quad \text{si } X \leq 1/\operatorname{tg} \delta$$

avec :

$$X + \operatorname{Arc} \sin (X \operatorname{tg} \delta) - \sqrt{1 - X^2 \operatorname{tg}^2 \delta} = \frac{\gamma D}{c} + \pi + 1$$

$$b) N_{cq\delta}^0 = 1/\operatorname{tg} \delta \quad \text{si } X > 1/\operatorname{tg} \delta.$$

8-1

BIBLIOGRAPHIE

Les résultats indiqués dans cette section ont été obtenus par Tràn-Vô-Nhiêm [1, 2, 3].

REFERENCES

- [1] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Terme de surface de la force portante limite d'une fondation à charge inclinée excentrée par la méthode du coin triangulaire minimal", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 267 (Paris, Juillet 1968), 137-140.
- [2] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles à charge inclinée et excentrée. Application au calcul de stabilité des murs de soutènement", 4^e Congrès Brésilien de Mécanique des Sols et Fondations, 1, 2, 3 (Guanabra, Août 1970), 1-28.
- [3] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble (Février 1971), 75-134.

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE INCLINÉE ET EXCENTRÉE**

(Semelle, Radier, Fondation de mur de soutènement)
sur un sol homogène horizontal mais de niveau différent de part et d'autre de la fondation

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

La surface du sol est horizontale mais de niveau différent de part et d'autre de la fondation (Fig. 1). C'est le cas, par exemple, des semelles de rive dans les immeubles ou des murs de soutènement.

Le sol est supposé homogène sur une épaisseur infinie. En pratique, si la couche de sol repose sur une autre plus dure, son épaisseur H en dessous de la base de la fondation doit être suffisante pour que les lignes de glissement puissent se développer. On pourra se reporter au cas de la charge verticale centrée (*) pour avoir une estimation de l'épaisseur minimale H .

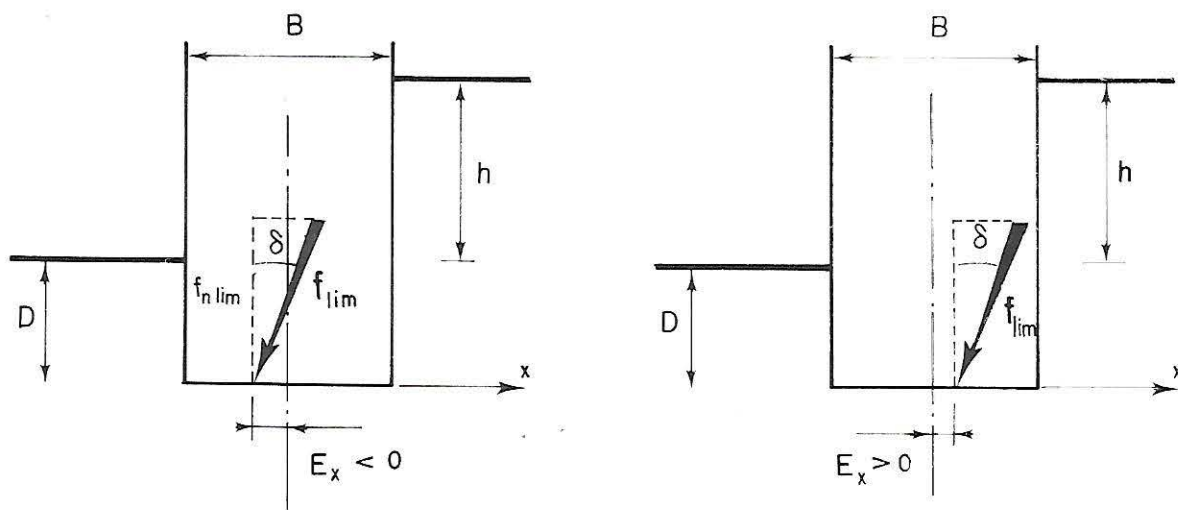


FIG. 1. — Définition du sol et de la fondation à charge inclinée et excentrée, et illustration des deux cas traités. On voit que notre étude est limitée aux cas où la charge est inclinée vers l'amont (autrement dit, sa composante tangentielle est orientée vers l'aval). Par convention, l'axe Ox est orienté dans le sens opposé à la composante tangentielle de la charge. Si la charge était inclinée à gauche et si l'aval était à droite, on aurait des dessins symétriques de ceux donnés ci-dessus, avec l'axe Ox orienté vers la gauche. Ces deux cas n'ont pas été dessinés car ils sont identiques à ceux figurés ci-dessus.

(*) Voir la définition du sol dans la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie. Sa base, de largeur constante B , est rigide (Fig. 1). Elle est située à la profondeur D du côté où la surface du sol est la plus basse (côté aval) et à la profondeur $D + h$ du côté où la surface du sol est la plus haute (côté amont).

Elle exerce sur le sol une charge inclinée d'un angle δ . La valeur limite (à la rupture) de cette charge est désignée par f_{lim} (force par unité de longueur). La pression limite, ou pression portante, est le quotient de la composante verticale de la charge limite par la largeur de la fondation :

$$(1) \quad p_{lim} = f_{lim} \cos \delta / B = f_{n \ lim} / B.$$

L'angle δ n'est pas orienté et, par conséquent, il n'a pas de signe. L'inclinaison fictive, δ^\bullet , est définie par :

$$(2) \quad \delta^\bullet = \text{Arc tg} \frac{p_{lim} \text{ tg } \delta}{p_{lim} + c \cotg \emptyset}$$

avec :

- δ^\bullet : inclinaison fictive de la charge
- δ : inclinaison réelle de la charge
- p_{lim} : pression limite
- c : cohésion du sol
- \emptyset : angle de frottement interne du sol.

Une excellente approximation de (2) est donnée par :

$$(3) \quad \delta^\bullet \approx \frac{\delta}{1 + (c \cotg \emptyset \cos \delta / p_{lim})}$$

Comme l'angle \emptyset , l'angle δ^\bullet n'a pas de signe, L'inclinaison fictive doit respecter la condition suivante :

$$(4) \quad \delta^\bullet < \emptyset.$$

Si la cohésion est nulle ($c = 0$), l'inclinaison fictive est égale à l'inclinaison réelle :

$$(5) \quad \delta^\bullet = \delta.$$

Le seul cas envisagé est celui d'une charge inclinée vers l'amont. Autrement dit, c'est le cas où la composante horizontale de la charge est orientée vers l'aval (Fig. 1).

Le point d'application de la charge se trouve à une distance E_x de l'axe de la fondation (Fig. 1). Le signe de E_x est donné par l'axe Ox qui, par convention, est orienté du côté opposé à celui de la composante horizontale de la charge. On définit l'excentricité de la charge par :

$$(6) \quad e_x = E_x / B.$$

L'excentricité e_x a la même signe que E_x . Elle peut donc être positive ou négative dans les limites suivantes :

$$(7) \quad -0,5 \leq e_x \leq 0,5.$$

Les deux cas de signe sont illustrés par la figure 1.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(8) \quad P_{lim} = cr_{cq} N_{c\delta} + \gamma Dr_{cq} N_{q\delta} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma h\delta}$$

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

B : largeur de la fondation

D : profondeur de la base de la fondation du côté aval

r_{cq} , r_{γ} : coefficients de réduction définis par (9) et (10)

$N_{c\delta}$, $N_{q\delta}$: coefficients sans dimensions dépendant de ϕ et δ^\bullet et dont les valeurs numériques sont données sous forme de graphique dans la section précédente (*)

(*) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol homogène horizontal" (Section 8-1).

$N_{\gamma h \delta}$: coefficient sans dimensions dépendant de \emptyset et δ^\bullet et dont les valeurs numériques sont données dans un graphique

\emptyset : angle de frottement interne du sol

δ^\bullet : inclinaison fictive définie par (2) et (3).

Les coefficients de réduction r_{cq} et r_γ sont positifs et compris entre 0 et 1. Ils sont donnés par les formules suivantes :

$$(9) \quad r_{cq} = 1 - 2|e_x|$$

$$(10) \quad r_\gamma = \left(\frac{1 \pm 2 e_x}{1 \pm 2 e_{opt}} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \text{signe + si } e_{opt} > e_x \\ \text{signe - si } e_{opt} < e_x \end{array}$$

e_x étant algébrique (positif ou négatif) et défini par (6) et e_{opt} étant positif.

Les valeurs numériques de e_{opt} , valeur optimale de l'excentricité pour laquelle $r_\gamma = 1$, sont données dans un graphique.

Notons également que, dans les graphiques donnés ci-après, $N_{\gamma h \delta}$ et e_{opt} ne dépendent pas de la dénivelée h (Fig. 1). Mais il faut, pour cela, que la condition suivante soit respectée :

$$(11) \quad h/B > 0,5.$$

Si h est inférieur à $B/2$, on considère que $N_{\gamma h \delta}$ a mêmes valeurs numériques que $N_{\gamma \delta}$ (*).

Pour les calculs pratiques, plusieurs cas sont à distinguer :

- Cas général ($c \neq 0$, $\emptyset \neq 0$) :

On voit, d'après les formules (2) ou (3), que δ^\bullet dépend de p_{lim} que l'on cherche. Il faudra donc procéder par approximations successives en remarquant, pour démarrer, que δ^\bullet est inférieur à δ . On obtient alors une valeur par défaut de la pression limite si l'on fait un premier calcul en remplaçant δ^\bullet par δ (notons que cette approximation est d'autant meilleure que δ est faible et qu'elle est impossible si δ est supérieur à \emptyset).

(*) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol homogène à surface horizontale" (Section 8-1).

- Cas du sol sans cohésion ($c = 0$) :

On a alors $\delta^\bullet = \delta$. Le calcul est direct (sans approximations successives).

- Cas du sol sans frottement ($\phi = 0$) :

On a alors :

$$(12) \quad N_{\gamma h \delta} = 0 \quad N_{q \delta} = 1$$

et il est préférable de grouper les deux coefficients $N_{c \delta}$ et $N_{q \delta}$ en un seul appelé $N_{cq \delta}^0$:

$$(13) \quad P_{lim} = (1 - 2|e_x|) c N_{cq \delta}^0.$$

Les valeurs numériques de $N_{cq \delta}^0$ sont données sous forme de graphique dans la section précédente (*).

- Cas de la charge normale excentrée ($\delta = 0$) :

La formule (8) devient alors :

$$(14) \quad P_{lim} = cr_{cq} N_c + \gamma D r_{cq} N_q + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma h \delta}.$$

Les deux coefficients N_c et N_q sont relatifs à une charge normale centrée. On trouve leurs valeurs numériques en se reportant à la section correspondante (**). Quant aux valeurs de $N_{\gamma h \delta}$, on les trouve dans le graphique de $N_{\gamma h \delta}$ donné ci-après, pour $\delta = 0$.

Exemple :

Considérons un mur de quai dont la base horizontale a pour largeur 6,7 m (22 ft) et se trouve à la profondeur $D = 4$ m (13 ft) (Fig. 2). Cette base supporte, du fait de la poussée des terres et du poids du mur, une charge Q de 125 t/m (84 000 lb/ft) inclinée de 15° sur la verticale et dont le point d'application se trouve à 0,67 m (2,2 ft) de l'axe de la base, du côté aval. La dénivelée entre la surface du sol à

(*) Voir la formule (12) de la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol homogène horizontal" (Section 8-1).

(**) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 7-1).

l'amont et à l'aval est de 7 m (23 ft). Les propriétés du sol sont : angle de frottement, $\phi = 30^\circ$, cohésion, $c = 0,2$ bar (420 lb/sq. ft), poids volumique immergé, $\gamma' = 1,1$ t/m³ (69 lb/cu. ft). Quel est le coefficient de sécurité de la fondation de ce mur ?

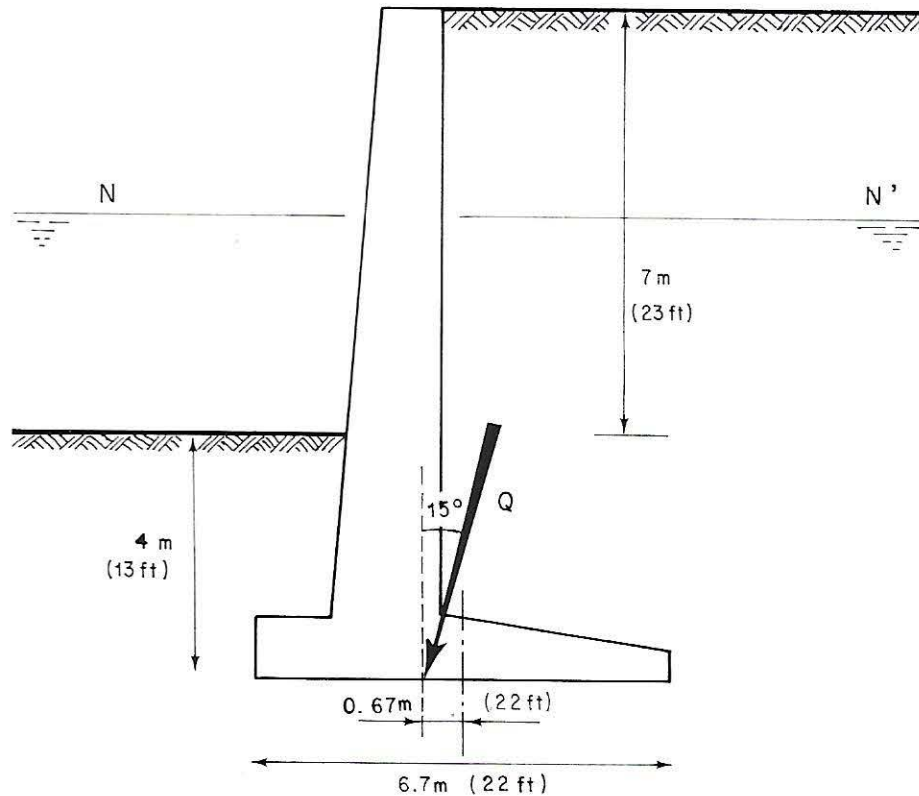


FIG. 2. — Définition du mur de quai de l'exemple. NN' est le niveau de l'eau.

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \gamma D &= 1\,100 \times 9,81 \times 4 \times 10^{-5} = 0,43 \text{ bar} \\ &= 69 \times 13 = 900 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= 0,5 \times 1\,100 \times 9,81 \times 6,7 \times 10^{-5} = 0,36 \text{ bar} \\ &= 0,5 \times 69 \times 22 = 760 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

$$e_x = E_x/B = -0,67/6,7 = -2,2/22 = -0,1$$

(on voit que l'excentricité est négative si l'on compare la Fig. 2 à la Fig. 1).

On peut alors calculer, d'après (9) :

$$r_{cq} = 1 - 0,2 = 0,8.$$

Par ailleurs, en supposant, en première approximation, $\delta^* = \delta = 15^\circ$, on lit sur le graphique ou la table donnant l'excentricité optimale, pour $\phi = 30^\circ$:

$$e_{opt} = 0,026$$

(l'emploi du graphique ou de la table donnant l'excentricité optimale est justifié car $h/B = 7/6,7 = 23/22$ est supérieur à 0,5).

On peut alors calculer, d'après (10) :

$$r_\gamma = \left(\frac{1 - 0,2}{1 + 0,05} \right)^2 = 0,58.$$

Enfin, on lit dans les tables et graphiques de la section précédente (*), pour $\phi = 30^\circ$ et en supposant, en première approximation $\delta^* = \delta = 15^\circ$:

$$N_{c\delta} = 16,23 \quad \text{et} \quad N_{q\delta} = 10,37.$$

De même, on lit dans la table et le graphique donnés ci-après :

$$N_{\gamma h\delta} = 6,56.$$

On peut alors calculer la pression limite à l'aide de la formule (8) :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 0,2 \times 0,8 \times 16,23 + 0,43 \times 0,8 \times 10,37 + 0,36 \times 0,58 \times 6,56 = 7,35 \text{ bars} \\ &= 420 \times 0,8 \times 16 + 900 \times 0,8 \times 10 + 760 \times 0,58 \times 6,5 = 15\,440 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Cette première valeur approchée de p_{lim} nous permet de calculer à l'aide de (3) :

$$\begin{aligned} \delta^* &= \frac{15^\circ}{1 + \frac{0,2 \times \cotg 30^\circ \times 0,966}{7,35}} = 14,3^\circ \\ &= \frac{15^\circ}{1 + \frac{420 \times \cotg 30^\circ \times 0,966}{15\,440}} = 14,3^\circ. \end{aligned}$$

Cette nouvelle valeur de δ^* permet de lire sur les graphiques de nouvelles valeurs de e_{opt} , $N_{c\delta}$, $N_{q\delta}$, $N_{\gamma h\delta}$ et de calculer une nouvelle valeur de p_{lim} . On trouve ainsi :

$$p_{lim} = 7,8 \text{ bars (16 300 lb/sq. ft.)}$$

(*) Voir la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol homogène horizontal" (Section 8-1).

Cette valeur est voisine de la précédente et il est inutile de faire un troisième calcul qui conduirait à une précision superflue.

Pour estimer le coefficient de sécurité de la fondation de ce mur, il faut calculer la pression p exercée réellement :

$$p = Q \cos \delta / B = \frac{125 \times 0,966 \times 9\,810}{6,7 \times 10^5}$$

$$= 1,77 \text{ bar}$$

$$= \frac{84\,000 \times 0,966}{22} = 3\,700 \text{ lb/sq. ft.}$$

Le coefficient de sécurité est alors :

$$F = 7,8 / 1,77 = 16\,300 / 3\,700 = 4,4.$$

TABLES ET GRAPHIQUES

$N_{yh\delta}$	p. 278-279
e_{opt}	p. 280-281

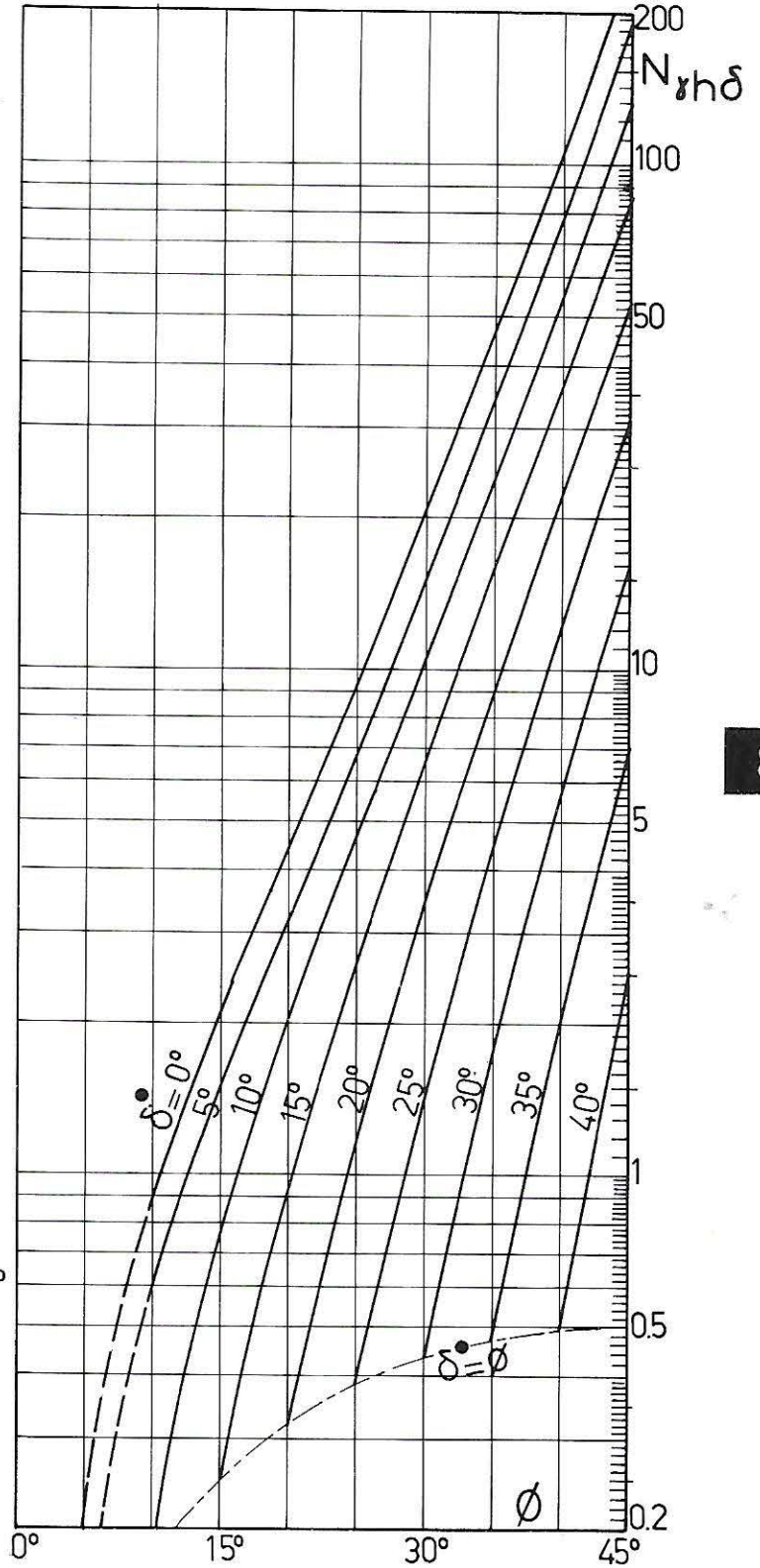
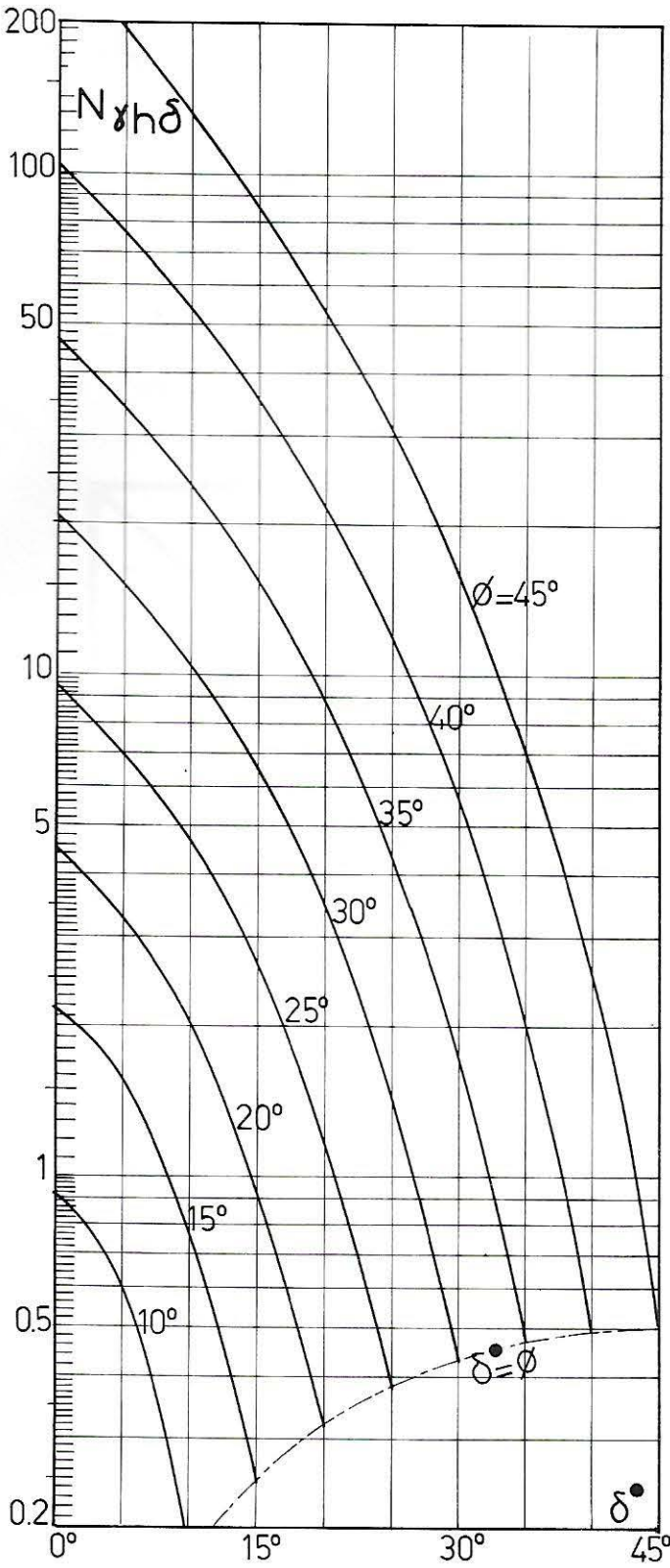
(pour $N_{c\delta}$ et $N_{q\delta}$, voir la section « **Fondation à base horizontale exerçant une charge inclinée et excentrée sur un sol homogène horizontal** », section 8-1)

N $\gamma h \delta$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	ϕ δ
0.91	2.16	4.50	9.50	20.7	46.5	105	275	0°
0.62	1.54	3.23	6.90	15.3	34.0	76.7	193	5°
0.17	0.74	2.06	4.70	10.5	23.6	53.2	132	10°
	0.25	0.90	2.60	6.56	15.6	35.4	86.4	15°
		0.32	1.14	3.52	8.80	21.7	53.0	20°
			0.38	1.40	4.30	12.0	31.0	25°
				0.43	1.76	5.60	16.0	30°
					0.47	2.00	7.0	35°
						0.49	2.50	40°
							0.50	45°

8-2

$N_{\gamma h \delta}$

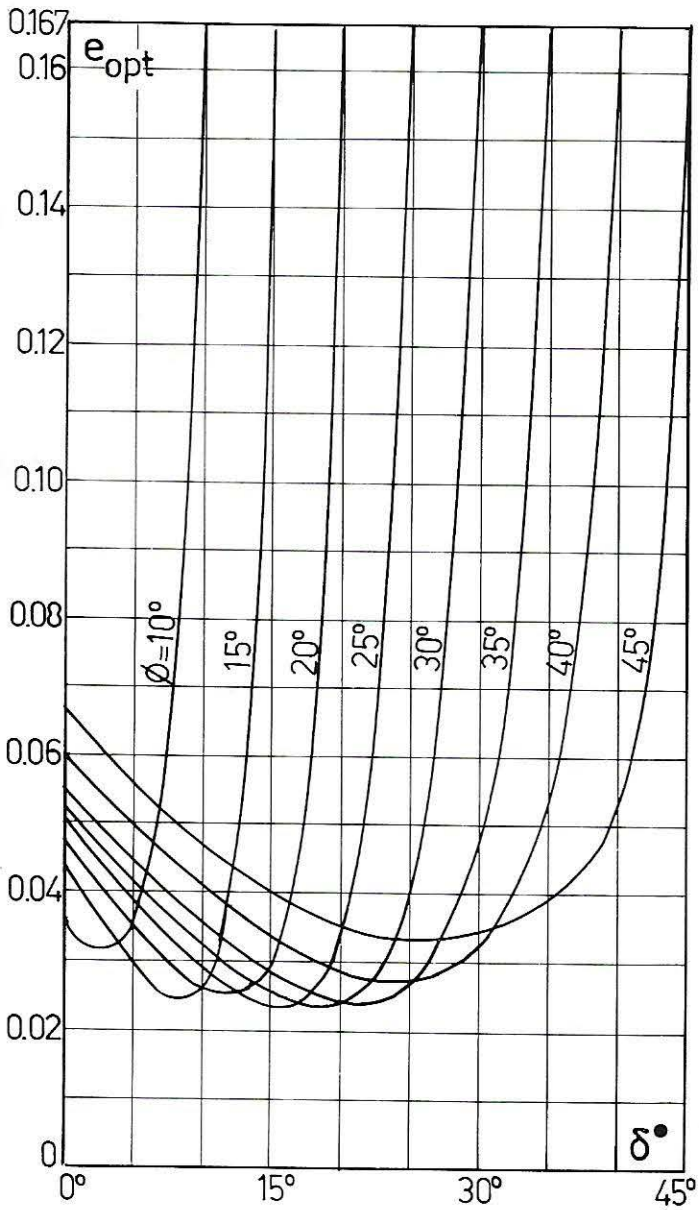


8-2

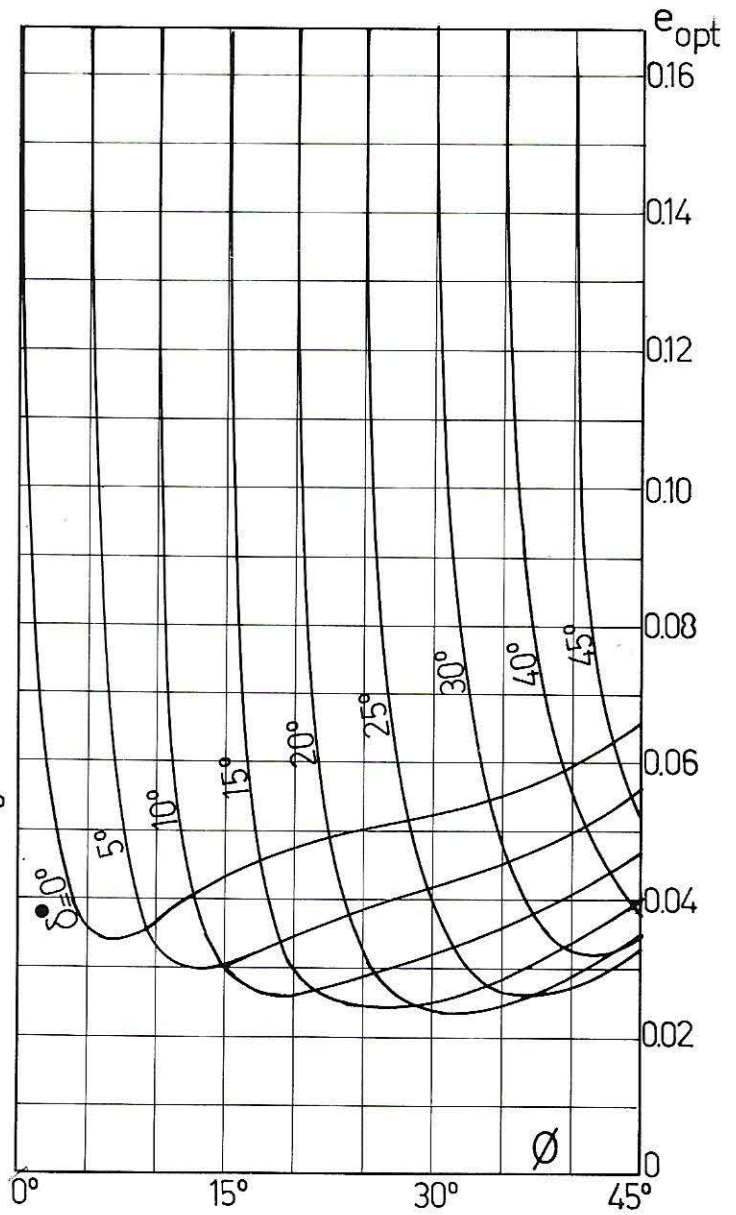
e_{opt}

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	ϕ δ°
0.035	0.043	0.048	0.050	0.052	0.054	0.060	0.067	0°
0.036	0.030	0.035	0.039	0.042	0.045	0.050	0.056	5°
0.167	0.025	0.026	0.029	0.033	0.036	0.041	0.047	10°
	0.167	0.029	0.023	0.026	0.029	0.034	0.040	15°
		0.167	0.032	0.023	0.025	0.029	0.035	20°
			0.167	0.039	0.026	0.028	0.033	25°
				0.167	0.048	0.032	0.035	30°
					0.167	0.055	0.039	35°
						0.167	0.051	40°
							0.167	45°

8-2



e_{opt}



8-2

EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$N_{c\delta}$, $N_{q\delta}$, $N_{cq\delta}^0$: voir section précédente

$N_{\gamma h\delta}$: pas d'expression analytique.

BIBLIOGRAPHIE

Les résultats indiqués dans cette section ont été obtenus par Trân-Vô-Nhiêm [1, 2].

REFERENCES

- [1] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble (Février 1971), 136-163.
- [2] TRÂN-VÔ-NHIÊM, M. MAURICE et J. KRZYŻANOWSKI, " Application de l'étude de la force portante limite des fondations superficielles aux calculs de stabilité des murs de soutènement", Revue Construction, Génie Civil (Gand, Septembre 1971).

**FONDATION A BASE HORIZONTALE
EXERÇANT UNE CHARGE INCLINÉE ET EXCENTRÉE**

(Semelle, Radier, Fondation de mur de soutènement)
sur un sol homogène en pente

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

La surface du sol est horizontale d'un côté de la fondation (côté amont) et inclinée de l'autre (côté aval) (Fig. 1). La pente descend à partir de la fondation et elle est définie par l'angle β qu'elle fait avec l'horizontale.

Le sol est supposé homogène dans tout le domaine nécessaire au développement des lignes de glissement. On pourra se reporter à la section relative aux fondations à charge verticale centrée sur un sol incliné pour avoir une estimation de l'étendue de ce domaine (*).

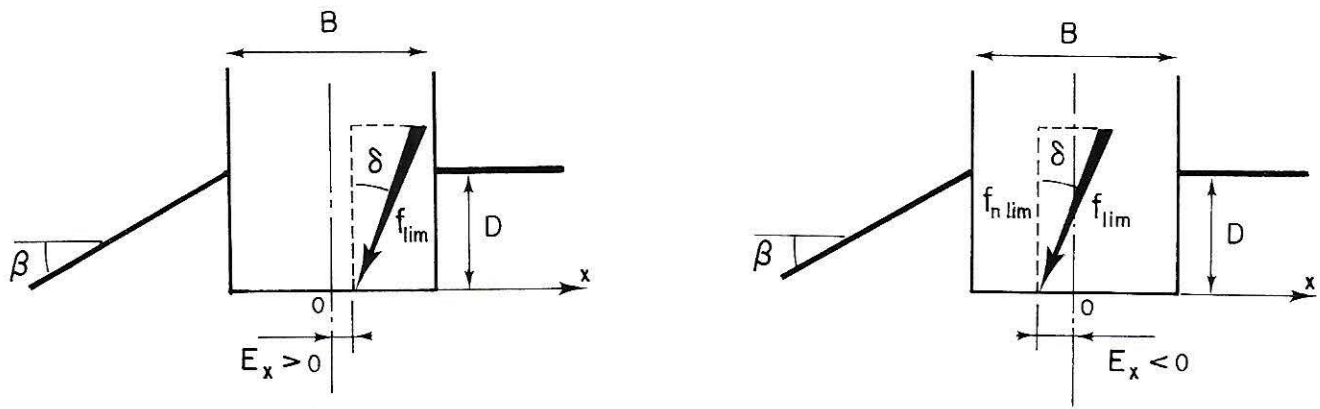


FIG. 1. — Définition du sol et de la fondation à charge inclinée et excentrée, et illustration des deux cas traités. On voit que notre étude est limitée aux cas où la charge est inclinée vers l'amont (autrement dit, sa composante tangentielle est orientée vers l'aval). Par convention, l'axe Ox est orienté dans le sens opposé à la composante tangentielle de la charge.

Si la charge était inclinée à gauche et si la pente était à droite, on aurait des dessins symétriques de ceux donnés ci-dessus, avec l'axe Ox orienté vers la gauche. Ces deux cas n'ont pas été dessinés car ils sont identiques à ceux figurés ci-dessus.

(*) Voir l'exemple 4 de la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène en pente" (Section 7-8).

Remarque

Bien que les résultats aient été obtenus dans le cas de la figure 2a (sol horizontal d'un côté et incliné de l'autre) ils sont également valables si le sol a la configuration indiquée sur les figures 2b et 2c. En revanche, nous ne sommes pas certains qu'ils soient valables dans le cas de la figure 2d.

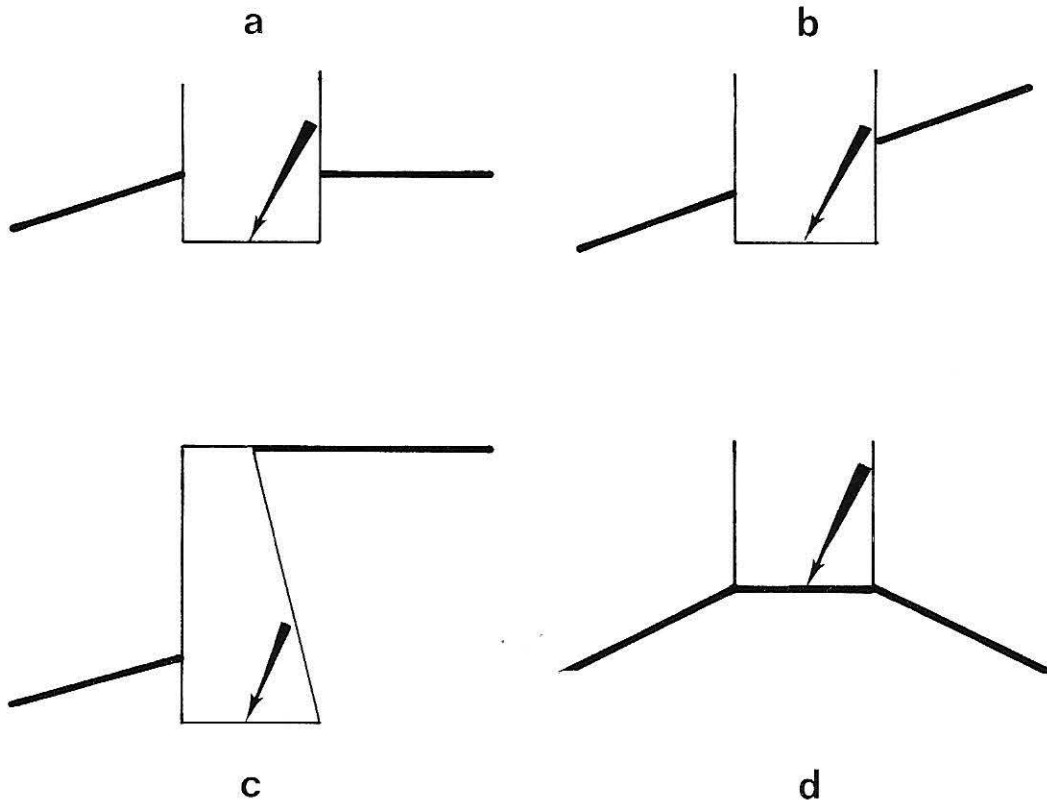


FIG. 2. — Les résultats ont été établis pour le cas (a) mais ils sont également valables pour les cas (b), (c) et (d).

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation a une longueur infinie, perpendiculairement aux lignes de plus grande pente. Sa base est rigide, elle est horizontale, située à la profondeur D et elle a une largeur constante B (Fig. 1). Elle exerce sur le sol une charge inclinée d'un angle δ . La valeur limite (à la rupture) de cette charge est désignée par f_{lim} (force par unité de longueur). La pression limite, ou pression portante,

est le quotient de la composante verticale de la charge limite par la largeur de la fondation :

$$(1) \quad p_{\text{lim}} = f_{\text{lim}} \cos \delta / B = f_{\text{n lim}} / B.$$

L'angle δ n'est pas orienté et, par conséquent, n'a pas de signe. L'inclinaison fictive δ^\bullet est définie par (*) :

$$(2) \quad \delta^\bullet = \text{Arc tg} \frac{p_{\text{lim}} \text{tg} \delta}{p_{\text{lim}} + c \cotg \varnothing}$$

avec :

- δ^\bullet : inclinaison fictive
- δ : inclinaison réelle
- p_{lim} : pression limite
- c : cohésion du sol
- \varnothing : angle de frottement interne du sol.

Une excellente approximation de (2) est donnée par :

$$(3) \quad \delta^\bullet \approx \frac{\delta}{1 + (c \cotg \varnothing \cos \delta / p_{\text{lim}})}.$$

Comme l'angle δ , l'angle δ^\bullet n'a pas de signe. L'inclinaison fictive doit respecter la condition suivante :

$$(4) \quad \delta \leq \varnothing.$$

Si la cohésion est nulle ($c = 0$), l'inclinaison fictive est égale à l'inclinaison réelle :

$$(5) \quad \delta^\bullet = \delta.$$

Le seul cas envisagé est celui d'une charge inclinée vers l'amont. Autrement dit, c'est le cas où la composante tangentielle de la charge est orientée vers l'aval (Fig. 1).

(*) En toute rigueur, il faudrait faire intervenir les coefficients de réduction r_{cq} et r_{y} définis plus loin. Mais ceci compliquerait considérablement la formule (2) pour un gain de précision négligeable.

Le point d'application de la charge se trouve à une distance E_x de l'axe de la fondation (Fig. 1). Le signe de E_x est donné par l'axe Ox qui, par convention, est orienté du côté opposé à celui de la composante horizontale de la charge. On définit l'excentricité de la charge par :

$$(6) \quad e_x = E_x/B.$$

L'excentricité e_x a le même signe que E_x . Elle peut donc être positive ou négative dans les limites suivantes :

$$(7) \quad -0,5 \leq e_x \leq 0,5.$$

Les deux cas de signes sont illustrés par la figure 1.

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(8) \quad p_{lim} = cr_{cq} N_{c\beta\delta} + \gamma D \cos \beta r_{cq} N_{q\beta\delta} + \frac{1}{2} \gamma B r_{\gamma} N_{\gamma\beta\delta}.$$

(Nota : le terme γD dont la signification est précisée dans le paragraphe 2b de l'introduction est ici $\gamma D \cos \beta$).

avec :

c : cohésion du sol

γ : poids volumique du sol

β : pente du terrain

B : largeur de la fondation

D : profondeur de la base de la fondation

r_{cq}, r_{γ} : coefficients de réduction définis par (9) et (10).

$N_{c\beta\delta}, N_{q\beta\delta}$: coefficients sans dimensions dépendant de $\phi, \beta, \delta^{\bullet}$ et δ_0

$N_{\gamma\beta\delta}$: coefficient sans dimensions dépendant de ϕ, β et δ^{\bullet}

ϕ : angle de frottement interne du sol

δ^{\bullet} : inclinaison fictive de la charge définie par (2) ou (3)

δ_0 : inclinaison fictive définie par (11).

Les coefficients de réduction r_{cq} et r_γ sont compris entre 0 et 1. Ils sont donnés par les formules suivantes :

$$(9) \quad r_{cq} = 1 - 2|e_x|$$

$$(10) \quad r_\gamma = \left(\frac{1 \pm 2 e_x}{1 \pm 2 e_{opt}} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \text{signe + si } e_{opt} > e_x \\ \text{signe - si } e_{opt} < e_x \end{array}$$

Les valeurs numériques de e_{opt} , excentricité optimale, pour laquelle $r_\gamma = 1$, sont données dans une série de graphiques en fonction de \emptyset , δ^\bullet et β . On notera que e_{opt} est toujours positif alors que e_x est algébrique (positif ou négatif).

L'inclinaison δ_0 est donnée par :

$$(11) \quad \delta_0 = \text{Arc tg} \frac{\sin \beta}{\cos \beta + \frac{c \cotg \emptyset}{\gamma D \cos \beta}}$$

(Nota : δ_0 est l'inclinaison fictive de la surcharge $\gamma D \cos \beta$ exercée par les terres sus-jacentes sur le plan passant par le bord de la fondation et parallèle à la pente.)

Une excellente approximation de cette expression est donnée par :

$$(12) \quad \frac{\delta_0}{\beta} = \frac{1}{1 + (c \cotg \emptyset / \gamma D \cos \beta)}$$

Les coefficients $N_{c\beta\delta}$ et $N_{q\beta\delta}$ ont été calculés pour toutes les valeurs courantes de \emptyset , β , δ^\bullet et δ_0 . Le coefficient $N_{\gamma\beta\delta}$ a été calculé pour toutes les valeurs courantes de \emptyset , β et δ^\bullet . Les valeurs numériques obtenues sont données ci-après sous forme de tables et de graphiques (*).

Examinons les divers cas susceptibles de se présenter :

↳ Cas général ($\emptyset \neq 0$, $c \neq 0$, $D \neq 0$) :

On voit, d'après les formules (2) et (3), que δ^\bullet dépend de p_{lim} que l'on cherche. Il faut donc procéder par approximations successives en remarquant, pour démarrer, que δ^\bullet est inférieur à δ . On obtient alors une valeur par défaut de la

(*) Les tables de $N_{c\beta\delta}$ et $N_{q\beta\delta}$ contiennent des colonnes vides qui correspondent aux cas impossibles pour lesquels δ_0 serait supérieur à \emptyset : on aurait alors un glissement d'ensemble de la tranche de sol supérieure d'inclinaison β et d'épaisseur $D \cos \beta$. Et bien entendu $N_{c\beta\delta}$, $N_{q\beta\delta}$ et $N_{\gamma\beta\delta}$ respectent la condition exprimée par la formule (4).

pression limite si l'on fait un premier calcul en remplaçant δ^* par δ (notons que cette approximation est d'autant meilleure que δ est faible et qu'elle est impossible si δ est supérieur à \emptyset).

Le calcul de δ_0 est immédiat par (11) ou (12). La valeur obtenue pour δ_0/β est comprise entre 0 et 1. Elle permet de choisir la table à laquelle il faut se reporter pour avoir la valeur de $N_{c\beta\delta}$ et $N_{q\beta\delta}$.

- Cas du sol sans cohésion ($\emptyset \neq 0$, $c = 0$, $D \neq 0$) :

On a alors $\delta^* = \delta$ et le calcul est direct (sans approximations successives).

De plus, on a $\delta_0/\beta = 1$ et la formule (8) se simplifie :

$$(13) \quad p_{lim} = \gamma D \cos \beta r_{cq} N_{q\beta\delta} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\beta\delta}.$$

Les valeurs numériques de $N_{\gamma\beta\delta}$ et celles de $N_{q\beta\delta}$ sont alors données dans les graphiques et les tables correspondant à $\delta_0/\beta = 1$.

- Cas d'une fondation non enterrée ($\emptyset \neq 0$, $c \neq 0$, $D = 0$) :

Le calcul doit se faire par approximations successives, comme dans le cas général, car δ^* est différent de δ .

De plus, on a $\delta_0/\beta = 0$. Enfin, la formule (8) se simplifie :

$$(14) \quad p_{lim} = cr_{cq} N_{c\beta\delta} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\beta\delta}.$$

Les valeurs numériques de $N_{c\beta\delta}$ et celles de $N_{\gamma\beta\delta}$ sont données dans les graphiques et les tables correspondant à $\delta_0/\beta = 0$.

- Cas d'une fondation non enterrée dans un sol sans cohésion ($\emptyset \neq 0$, $c = 0$, $D = 0$) :

On a alors $\delta^* = \delta$. Le calcul est donc direct (sans approximations successives)

Par ailleurs δ_0 est indéterminé, ce qui n'a aucune importance car seul intervient dans la formule le coefficient $N_{\gamma\beta\delta}$, indépendant de δ_0 :

$$(15) \quad p_{lim} = \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\beta\delta}.$$

- Cas du sol sans frottement ($\phi = 0$, $c \neq 0$, $D \neq 0$) :

On a alors :

$$(16) \quad N_{\gamma\beta\delta} = 0.$$

et, il est préférable de grouper les deux coefficients de $N_{c\beta\delta}$ et $N_{q\beta\delta}$ en un seul appelé $N_{cq\beta\delta}^0$:

$$(17) \quad p_{\text{lim}} = (1 - 2|e_x|) cN_{cq\beta\delta}^0.$$

Les valeurs numériques de $N_{cq\beta\delta}^0$ sont données sous forme de tables et de graphiques en fonction de l'inclinaison réelle δ (*)

- Cas d'une fondation non enterrée dans un sol sans frottement ($\phi = 0$,

$c \neq 0$, $D = 0$) :

Le coefficient $N_{\gamma\beta\delta}$ est nul et le coefficient $N_{q\beta\delta}$ est inutile. Il ne reste que le coefficient $N_{c\beta\delta}$ que l'on écrit $N_{c\beta\delta}^0$ et la formule donnant la pression limite s'écrit :

$$(18) \quad p_{\text{lim}} = (1 - 2|e_x|) cN_{c\beta\delta}^0.$$

Les valeurs numériques de $N_{c\beta\delta}^0$ sont données dans un graphique et une table en fonction de l'inclinaison réelle δ .

- Cas de la charge normale ($\delta = 0$) :

Les coefficients de force portante s'écrivent alors : $N_{c\beta}$, $N_{q\beta}$ et $N_{\gamma\beta}$. La formule donnant la pression limite devient :

• si la charge est centrée ($e_x = 0$) :

$$(19) \quad p_{\text{lim}} = cN_{c\beta} + \gamma D \cos \beta N_{q\beta} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma\beta}$$

• si la charge est excentrée :

$$(20) \quad p_{\text{lim}} = cr_{cq} N_{c\beta} + \gamma D \cos \beta r_{cq} N_{q\beta} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\beta}.$$

(*) Les tables de $N_{cq\beta\delta}^0$ sont limitées au cas $\gamma D \cos \beta \sin \beta \leq c$. Si cette condition n'était pas respectée, la tranche de sol supérieure d'inclinaison β et d'épaisseur $D \cos \beta$ glisserait dans son ensemble.

Les valeurs numériques des coefficients $N_{c\beta}$, $N_{q\beta}$ et $N_{\gamma\beta}$ se trouvent dans les tables et graphiques de $N_{c\beta\delta}$, $N_{q\beta\delta}$ et $N_{\gamma\beta\delta}$ pour $\delta = 0$. On trouve également $N_{c\beta}$, $N_{q\beta}$ et $N_{\gamma\beta}$ sous forme de tables et de graphiques dans la section "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène en pente" (Section 7-8).

Exemple 1 :

Considérons la fondation définie sur la Fig. 3. Les propriétés du sol sont : cohésion 0,1 bar (210 lb/sq. ft), angle de frottement 30° et poids volumique $1,8 \text{ g/cm}^3$ (112 lb/cu. ft). Quelle est la force portante limite ?

Calculons d'abord :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \gamma B &= 0,5 \times 1\,800 \times 9,81 \times 7 = 62\,000 \text{ N/m}^2 = 0,62 \text{ bar} \\ &= 0,5 \times 112 \times 23 = 1\,290 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

L'excentricité est donnée par :

$$e_x = -0,7/7 = -28/(23 \times 12) = -0,1$$

d'où :

$$r_{cq} = 1 - 0,2 = 0,8.$$

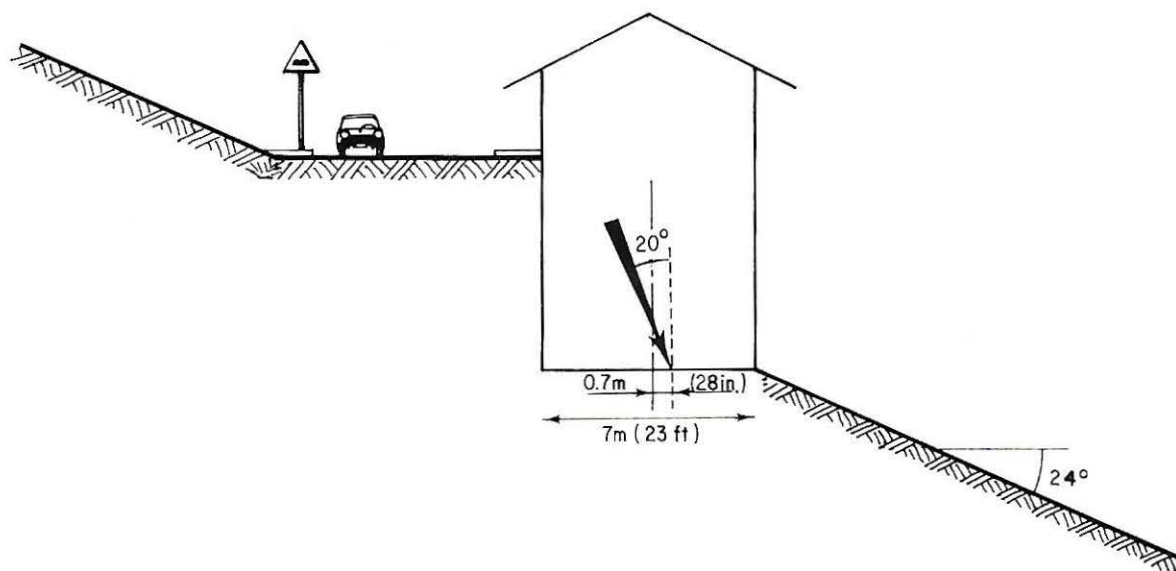


FIG. 3. — Fondation de l'exemple 1.

Pour la suite, il faut supposer que $\delta^{\bullet} = \delta = 20^{\circ}$

On lit alors dans les graphiques pour $\beta/\phi = 24/30 = 0,8$:

$$e_{\text{opt}} = 0,027 \quad \text{et} \quad N_{\gamma\beta\delta} = 1,18.$$

Et, en interpolant entre $\beta = 20^{\circ}$ et $\beta = 30^{\circ}$:

$$N_{c\beta\delta} = 6,5 \quad (\delta_0 = 0 \text{ puisque } D = 0).$$

On peut alors calculer :

$$r_{\gamma} = \left(\frac{1 - 0,2}{1 - 0,054} \right)^2 = 0,72.$$

En utilisant la formule (14), on a :

$$\begin{aligned} p_{\text{lim}} &= 0,1 \times 0,8 \times 6,5 + 0,62 \times 0,72 \times 1,18 \\ &= 0,52 + 0,53 = 1,05 \text{ bar} \\ &= 210 \times 0,8 \times 6,5 + 1\,290 \times 0,72 \times 1,18 \\ &= 1\,090 + 1\,100 = 2\,190 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

Connaissant cette première valeur approchée de p_{lim} , on peut calculer δ^{\bullet} à l'aide de la formule (3) et obtenir dans les graphiques de nouvelles valeurs de e_{opt} , $N_{c\beta\delta}$ et $N_{\gamma\beta\delta}$. Mais le gain de précision est négligeable.

Exemple 2 (Fig. 4) :

Considérons un massif argileux saturé (frottement nul, cohésion 0,4 bar - 830 lb/sq. ft) limité par une pente de 30° . On désire placer sur le terre-plein qui est au sommet de cette pente un appui qui exercera une charge inclinée de 20° et centrée. Quelle est la pression limite que peut exercer cet appui sur le sol ?

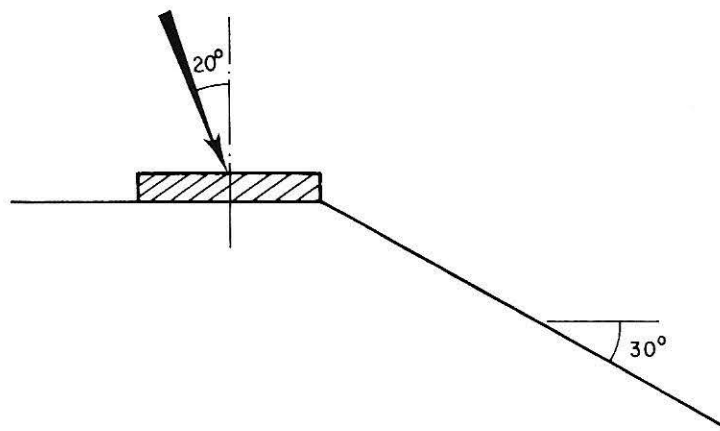


FIG. 4. — Définition de l'appui de l'exemple 2.

Appliquons la formule (18). La charge étant centrée, $e_x = 0$. Pour $\delta = 20^\circ$ et $\beta = 30^\circ$, on lit dans le graphique et la table :

$$N_{c\beta\delta}^0 = 2,44$$

d'où :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 0,4 \times 2,44 = 0,98 \text{ bar} \\ &= 830 \times 2,44 = 2\,000 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

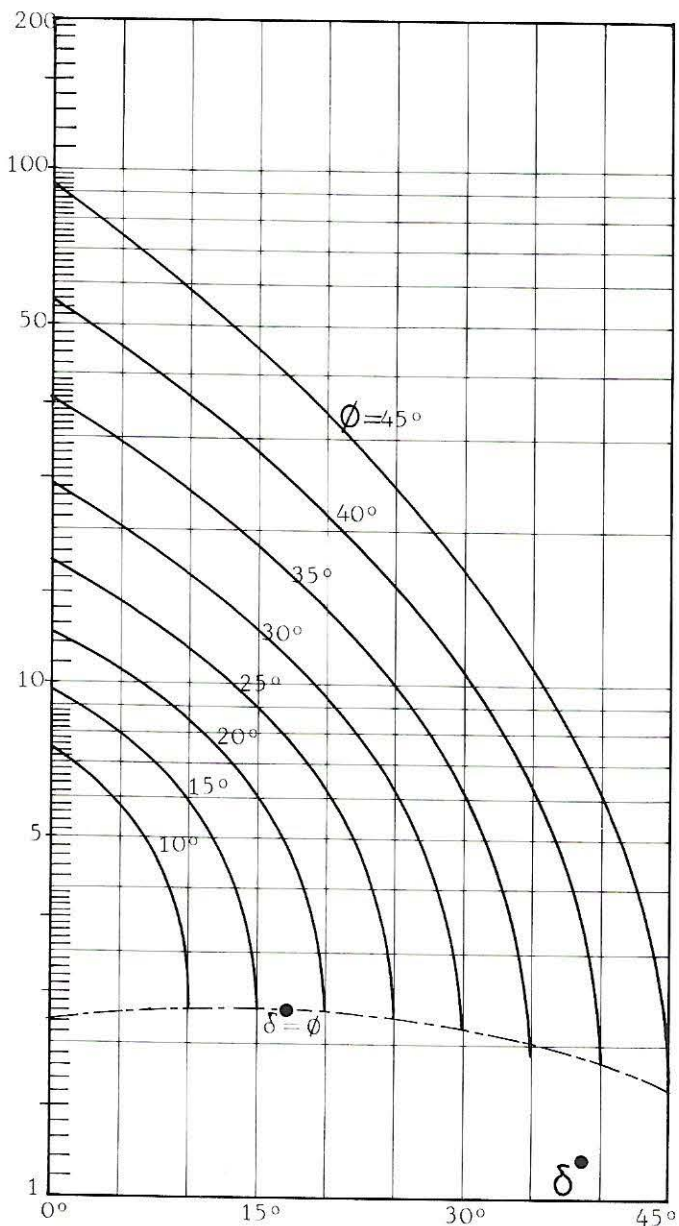
TABLES ET GRAPHIQUES

$N_{c\beta\delta}$	p. 294-328
(Notons que, dans le cas $\delta_0 = 0$, on retrouve les valeurs numériques de ce coefficient en remplaçant ω par β dans $N_{c\omega\delta}$ de la section 8-4.)	
$N_{q\beta\delta}$	p. 329-363
$N_{\gamma\beta\delta}$	p. 364-373
e_{opt}	p. 374-383
$N_{cq\beta\delta}^0$	p. 384-389
$N_{c\beta\delta}^0$	p. 390-391

$N_{c\beta\delta}$

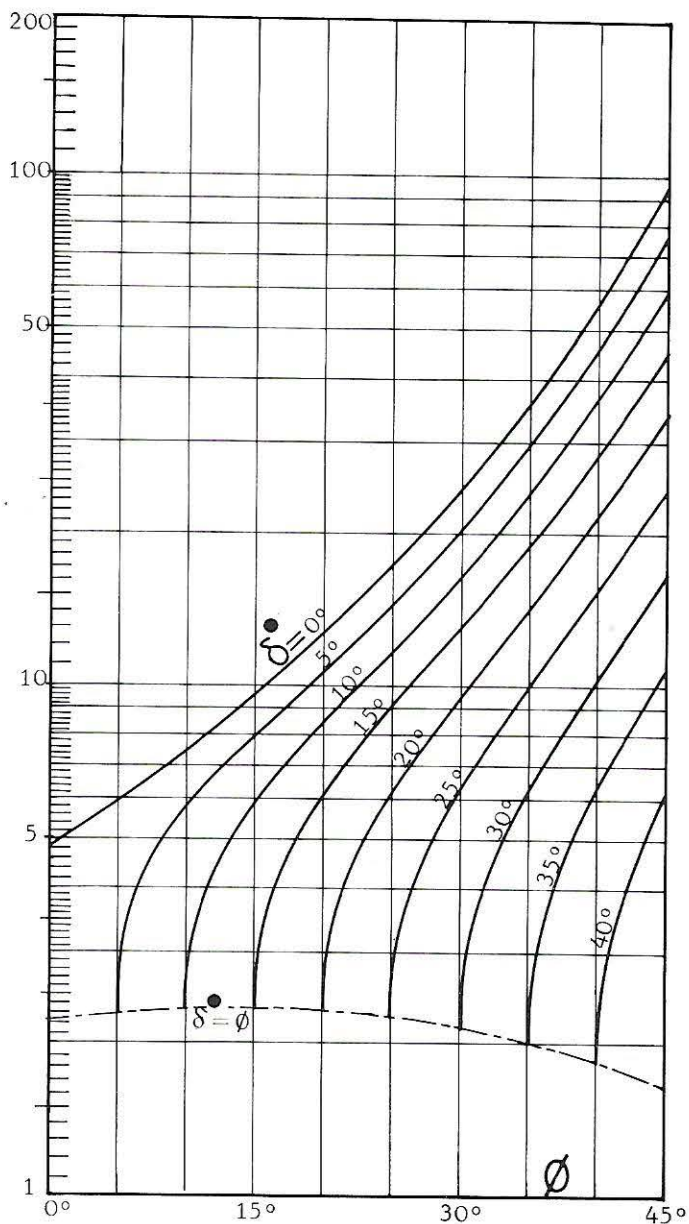
$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	5.94	7.50	9.66	12.73	17.28	24.32	35.81	55.88	94.13	175.77
0.1	5.77	7.22	9.19	11.94	15.94	21.96	31.51	47.64	77.10	136.88
0.2	5.58	6.91	8.69	11.12	14.57	19.62	27.39	40.03	62.12	104.58
0.3	5.37	6.58	8.16	10.27	13.18	17.33	23.49	33.11	49.14	78.26
0.4	5.15	6.22	7.60	9.39	11.79	15.10	19.83	26.89	38.08	57.19
0.5	4.89	5.83	7.00	8.49	10.40	12.95	16.43	21.38	28.79	40.65
0.6	4.61	5.41	6.37	7.55	9.01	10.87	13.29	16.54	21.12	27.91
0.7	4.29	4.94	5.69	6.57	7.62	8.87	10.41	12.34	14.86	18.30
0.8	3.91	4.40	4.94	5.54	6.20	6.93	7.76	8.71	9.83	11.19
0.9	3.42	3.73	4.05	4.37	4.69	4.99	5.27	5.54	5.78	6.00
1	2.29	2.33	2.34	2.31	2.25	2.15	2.01	1.84	1.64	1.40

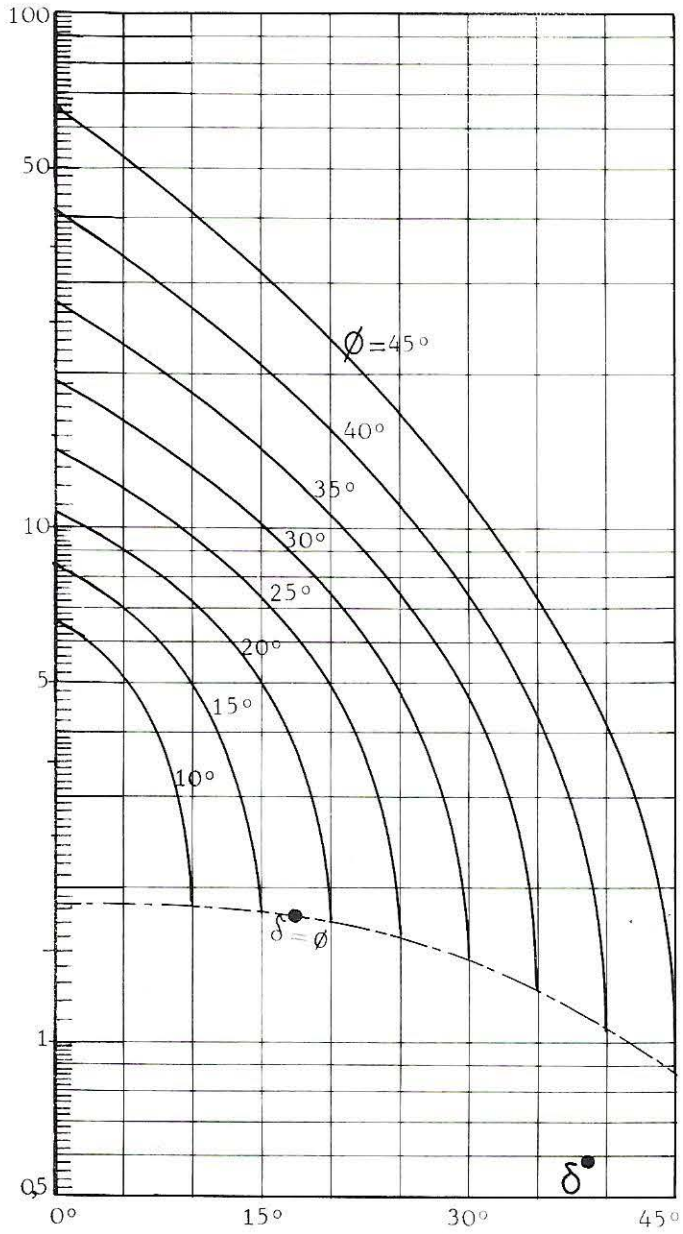


$$N_{c\beta\delta}$$

$$\beta = 10^\circ \quad \delta_0 = 0$$

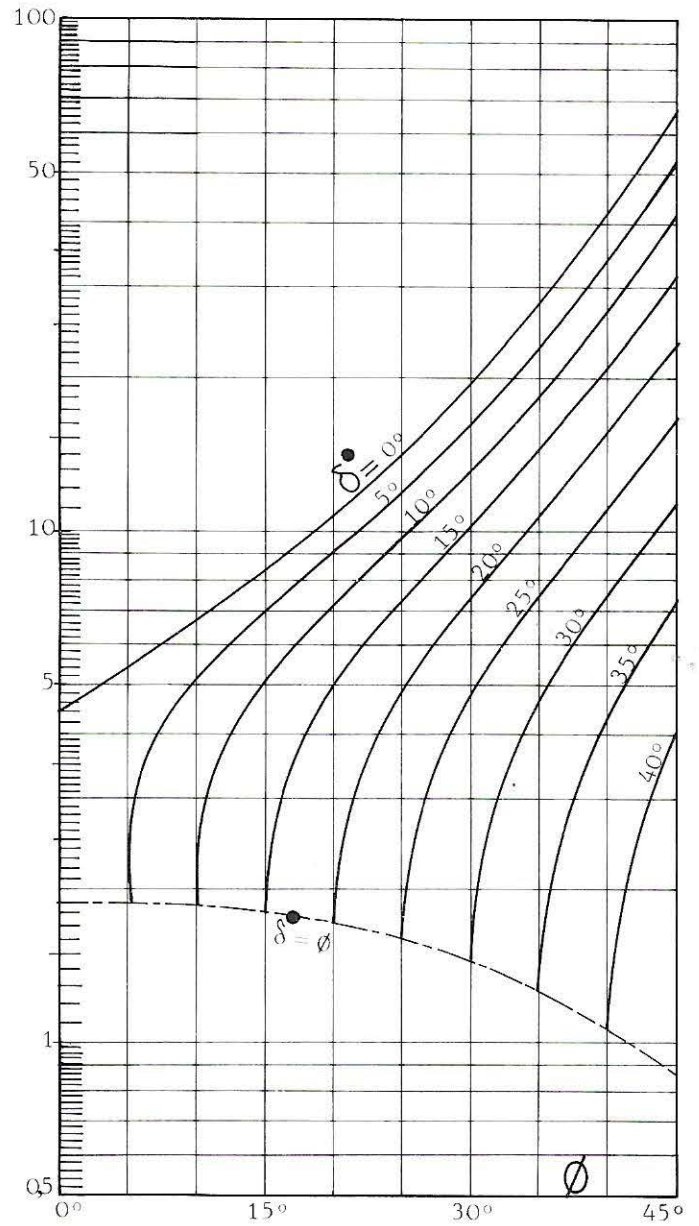


8-3



$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 20^\circ \quad \delta_0 = 0$



8-3

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	5.42	6.72	8.46	10.88	14.36	19.56	27.73	41.39	66.10	115.66
0.1	5.25	6.45	8.03	10.19	13.22	17.63	24.37	35.24	54.09	90.01
0.2	5.07	6.16	7.58	9.47	12.06	15.72	21.14	29.56	43.52	68.70
0.3	4.87	5.85	7.10	8.72	10.88	13.85	18.09	24.40	34.37	51.34
0.4	4.65	5.51	6.59	7.94	9.70	12.03	15.22	19.76	26.56	37.44
0.5	4.40	5.15	6.05	7.15	8.52	10.27	12.55	15.65	20.01	26.53
0.6	4.13	4.75	5.47	6.32	7.34	8.57	10.10	12.04	14.60	18.13
0.7	3.82	4.31	4.85	5.46	6.15	6.93	7.84	8.90	10.19	11.79
0.8	3.45	3.80	4.17	4.55	4.94	5.35	5.77	6.20	6.64	7.10
0.9	2.97	3.17	3.36	3.52	3.66	3.76	3.82	3.83	3.78	3.67
1	1.88	1.85	1.80	1.71	1.59	1.44	1.27	1.07	0.86	0.64

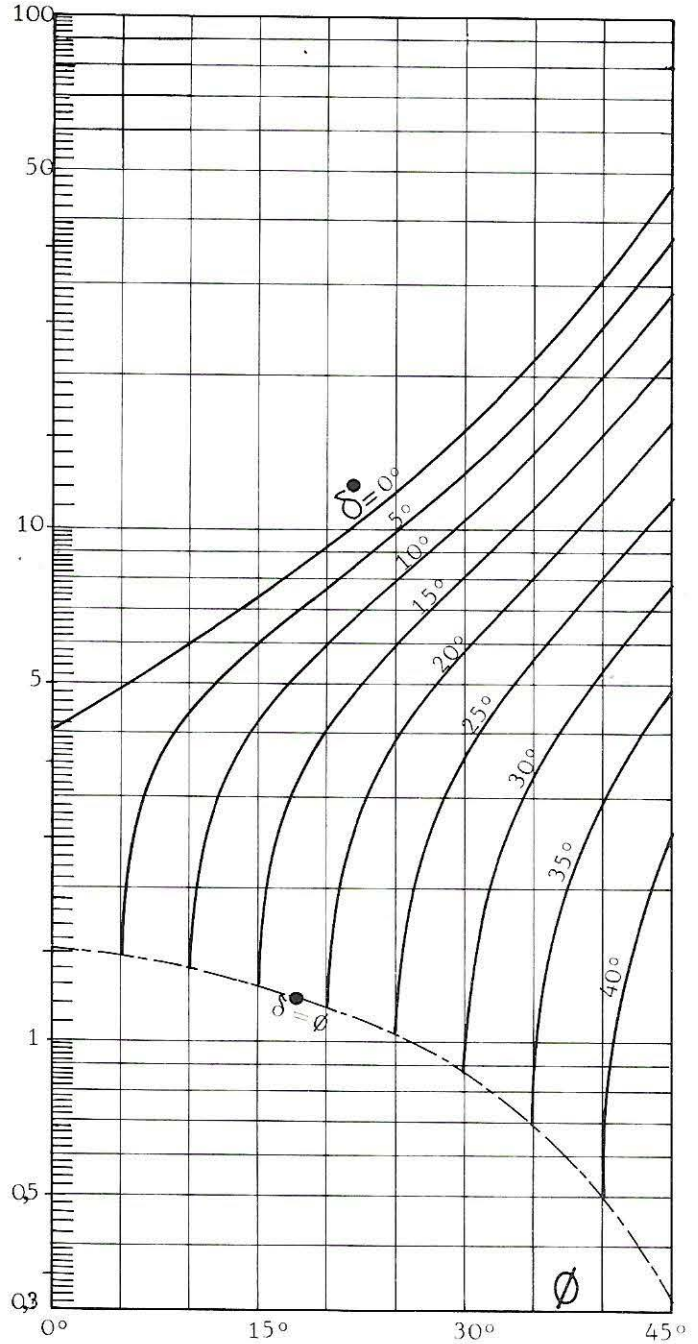
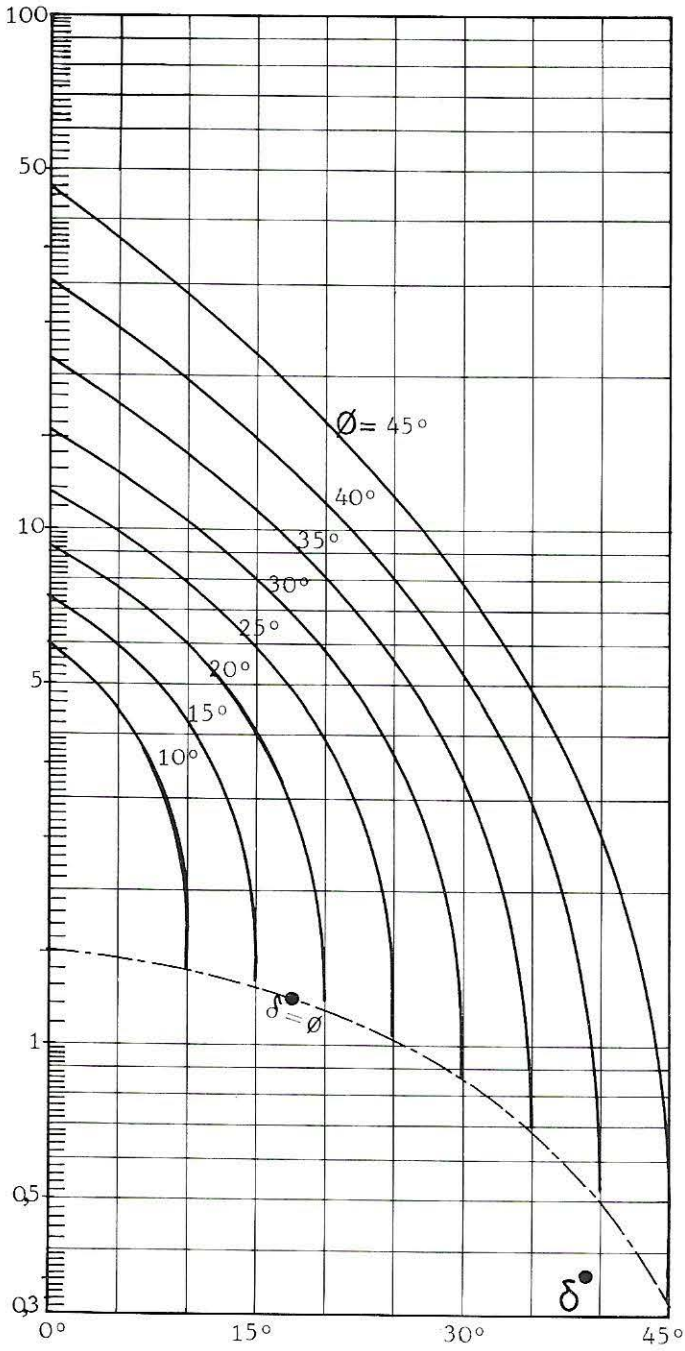
$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

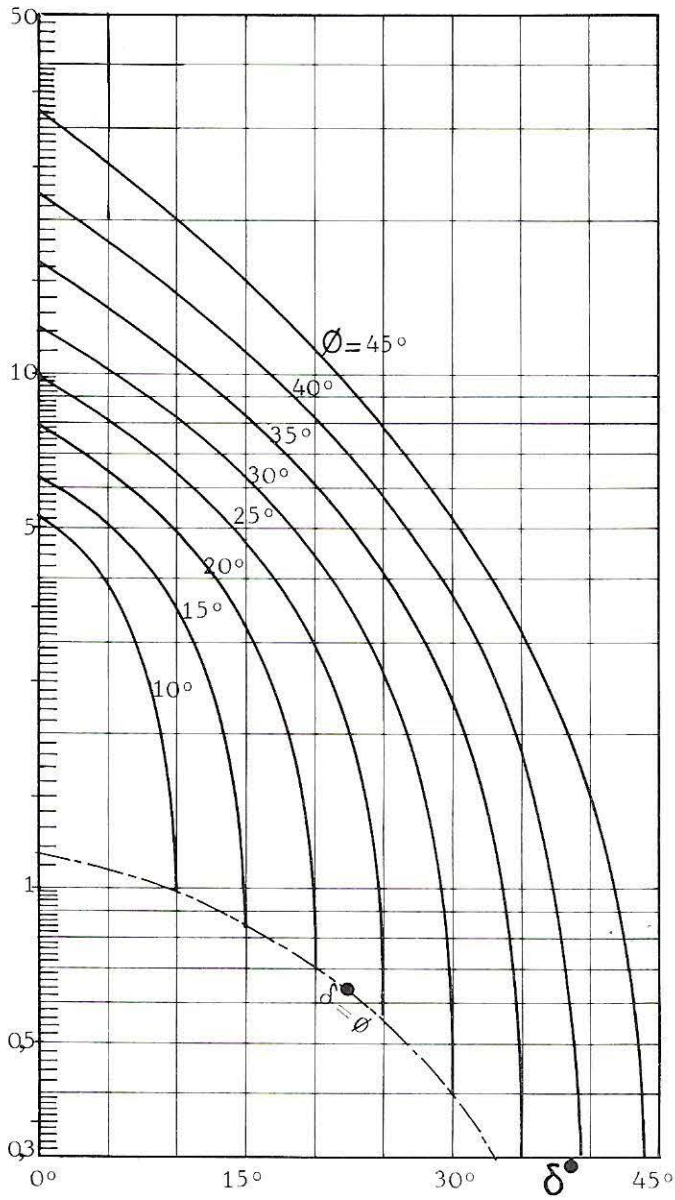
$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	4.92	5.98	7.37	9.26	11.88	15.67	21.41	30.58	46.32	76.01
0.1	4.75	5.72	6.98	8.65	10.91	14.10	18.77	25.99	37.85	59.09
0.2	4.57	5.45	6.57	8.01	9.92	12.54	16.25	21.75	30.40	45.04
0.3	4.38	5.16	6.13	7.35	8.92	11.01	13.85	17.90	23.94	33.58
0.4	4.16	4.84	5.66	6.67	7.92	9.52	11.61	14.44	18.44	24.41
0.5	3.93	4.50	5.17	5.97	6.92	8.08	9.52	11.37	13.82	17.21
0.6	3.66	4.13	4.65	5.24	5.91	6.69	7.60	8.68	10.00	11.67
0.7	3.36	3.71	4.08	4.48	4.90	5.35	5.83	6.34	6.89	7.49
0.8	3.00	3.23	3.46	3.68	3.88	4.06	4.21	4.32	4.39	4.39
0.9	2.54	2.64	2.73	2.77	2.79	2.76	2.68	2.55	2.37	2.13
1	1.47	1.40	1.30	1.18	1.03	0.86	0.68	0.49	0.31	0.14

$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 30^\circ \quad \delta_o = 0$

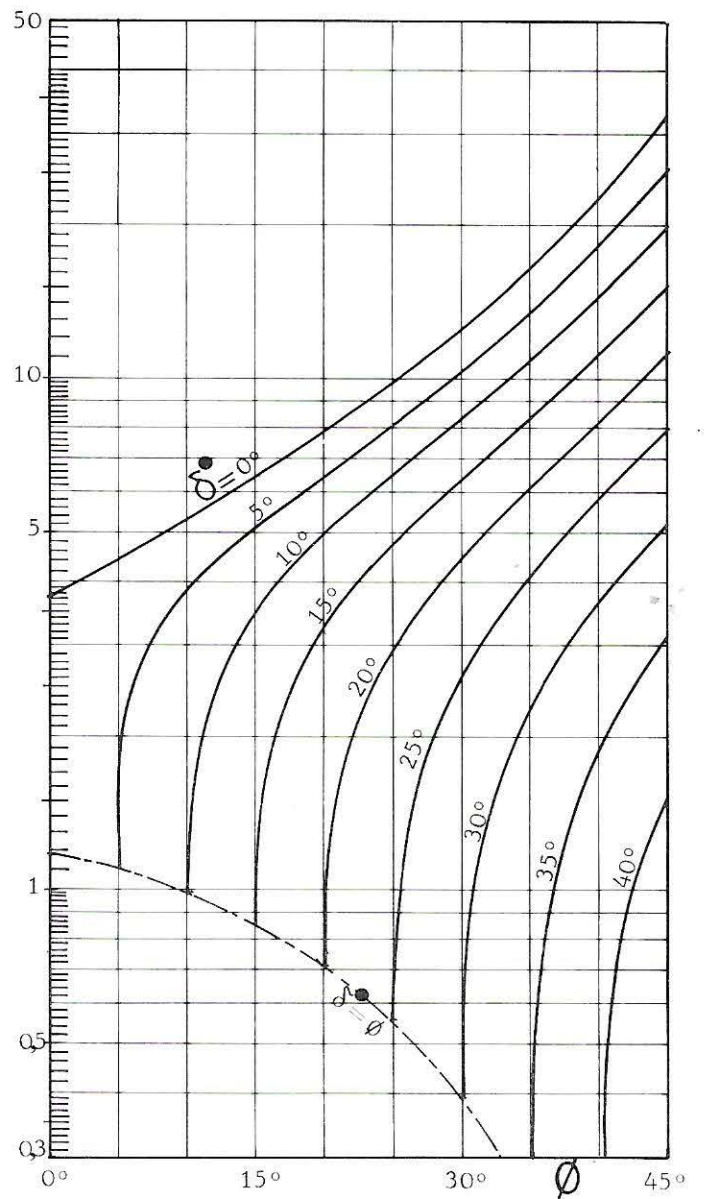


8-3



$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 40^\circ \quad \delta_0 = 0$



8-3

$N_{c\beta\delta}$

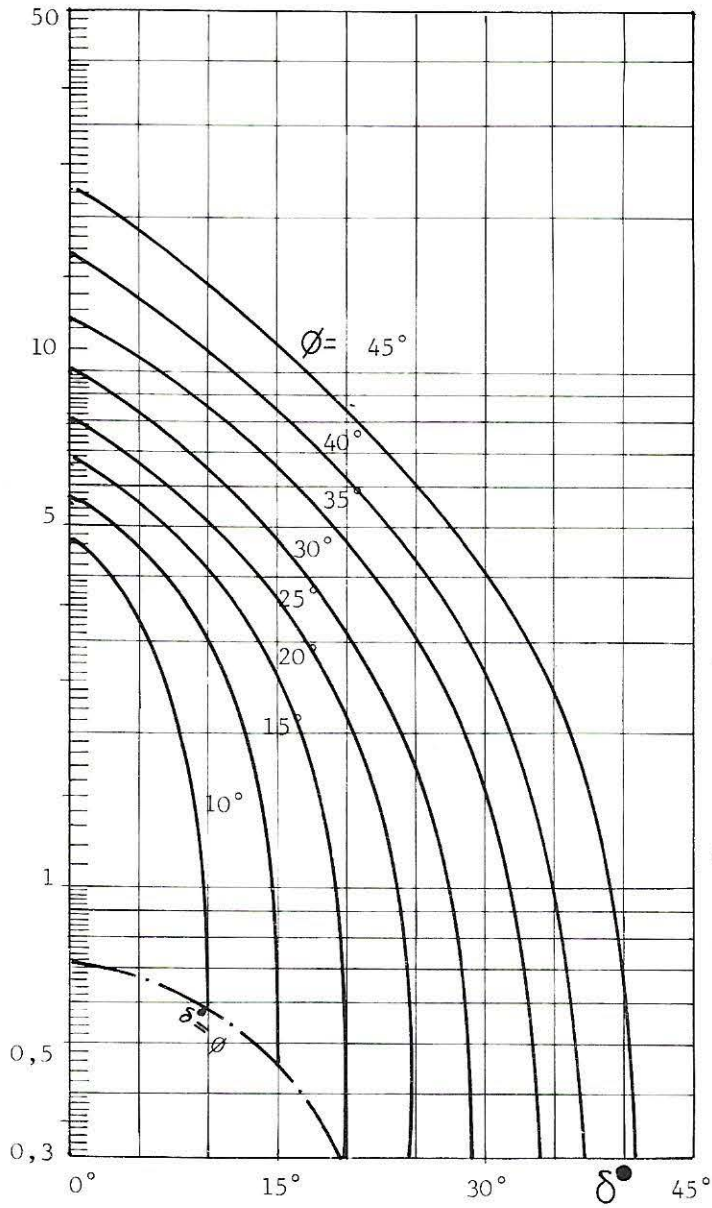
$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	4.42	5.28	6.38	7.82	9.77	12.50	16.46	22.51	32.38	49.86
0.1	4.27	5.04	6.02	7.29	8.95	11.21	14.39	19.08	26.40	38.69
0.2	4.09	4.79	5.65	6.72	8.11	9.93	12.41	15.93	21.15	29.42
0.3	3.90	4.51	5.25	6.14	7.26	8.68	10.54	13.05	16.59	21.86
0.4	3.70	4.22	4.82	5.54	6.41	7.46	8.78	10.47	12.71	15.82
0.5	3.46	3.89	4.38	4.93	5.55	6.28	7.15	8.18	9.45	11.07
0.6	3.21	3.54	3.90	4.29	4.70	5.15	5.64	6.17	6.76	7.41
0.7	2.91	3.15	3.39	3.62	3.84	4.06	4.25	4.43	4.56	4.65
0.8	2.56	2.70	2.82	2.91	2.97	3.00	2.98	2.92	2.80	2.61
0.9	2.12	2.15	2.15	2.12	2.05	1.94	1.79	1.60	1.38	1.12
1	1.09	0.98	0.85	0.71	0.55	0.39	0.23	0.08	0	0

$N_{c\beta\delta}$

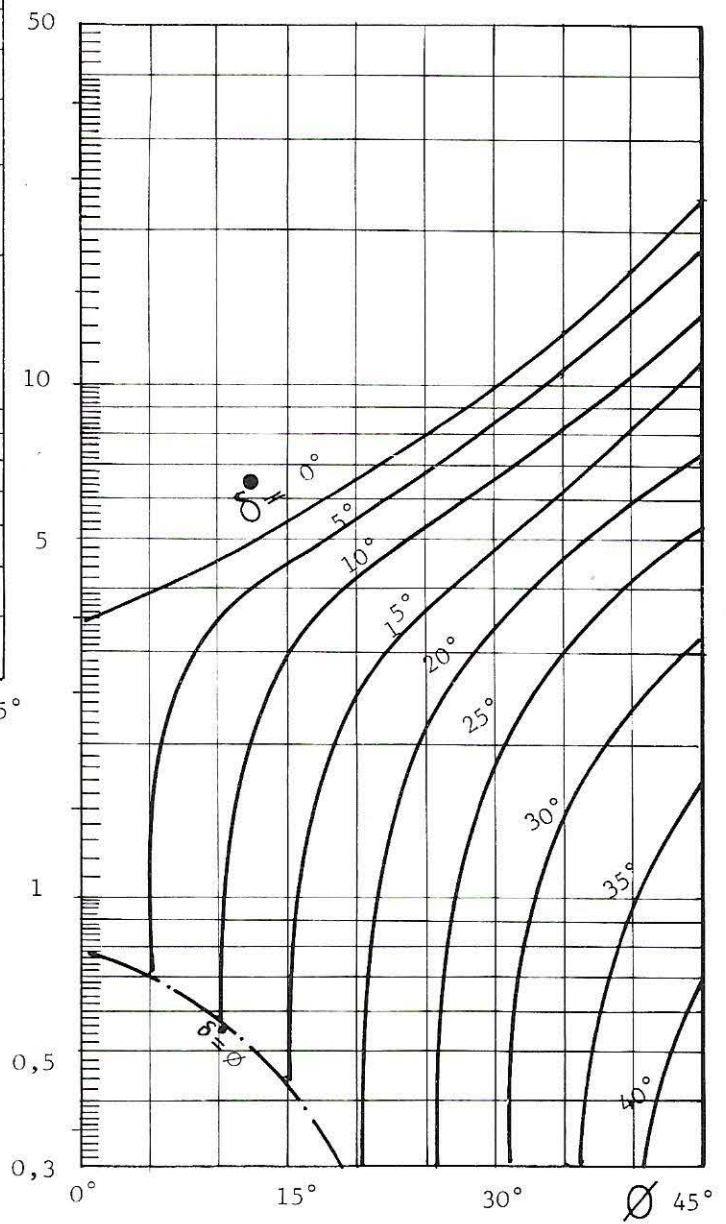
$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	3.95	4.63	5.48	6.56	7.98	9.90	12.58	16.49	22.54	32.60
0.1	3.79	4.40	5.15	6.09	7.28	8.84	10.96	13.93	18.33	25.24
0.2	3.63	4.16	4.81	5.59	6.57	7.80	9.41	11.58	14.62	19.12
0.3	3.44	3.90	4.44	5.08	5.85	6.78	7.94	9.43	11.41	14.14
0.4	3.24	3.63	4.06	4.55	5.12	5.78	6.57	7.51	8.67	10.15
0.5	3.02	3.32	3.65	4.01	4.40	4.82	5.29	5.80	6.37	7.01
0.6	2.77	2.99	3.22	3.45	3.67	3.89	4.10	4.30	4.47	4.60
0.7	2.48	2.62	2.75	2.86	2.94	3.00	3.02	3.00	2.92	2.78
0.8	2.14	2.20	2.23	2.23	2.20	2.13	2.03	1.87	1.68	1.44
0.9	1.71	1.68	1.62	1.53	1.42	1.27	1.09	0.90	0.69	0.48
1	0.71	0.58	0.45	0.30	0.16	0.02	0	0	0	0



$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 50^\circ \quad \delta_o = 0$



8-3

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	5.27	7.08	9.28	12.34	16.84	23.78	35.12	54.94	92.74	173.50
0.1	5.10	6.81	8.82	11.57	15.52	21.47	30.90	46.83	75.96	135.12
0.2	4.92	6.51	8.34	10.77	14.18	19.18	26.86	39.35	61.20	103.23
0.3	4.72	6.19	7.82	9.94	12.83	16.94	23.03	32.54	48.41	77.24
0.4	4.50	5.84	7.28	9.09	11.48	14.76	19.44	26.43	37.51	56.45
0.5	4.26	5.47	6.70	8.20	10.12	12.64	16.10	21.01	28.36	40.12
0.6	3.99	5.06	6.09	7.29	8.76	10.61	13.02	16.25	20.79	27.55
0.7	3.68	4.60	5.43	6.34	7.39	8.65	10.19	12.12	14.63	18.06
0.8	3.31	4.08	4.70	5.33	6.01	6.75	7.59	8.55	9.67	11.04
0.9	2.84	3.43	3.83	4.19	4.53	4.85	5.15	5.43	5.68	5.91
1	1.75	2.07	2.17	2.18	2.15	2.07	1.95	1.79	1.60	1.37

N_{cβδ}

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	3.70	5.85	7.73	10.17	13.59	18.67	26.64	39.97	64.11	112.65
0.1	3.55	5.60	7.33	9.51	12.50	16.82	23.40	34.02	52.46	87.66
0.2	3.39	5.33	6.90	8.82	11.39	14.99	20.29	28.53	42.20	66.90
0.3	3.21	5.04	6.45	8.11	10.27	13.20	17.35	23.54	33.32	49.99
0.4	3.01	4.73	5.97	7.38	9.14	11.45	14.59	19.06	25.75	36.45
0.5	2.79	4.39	5.46	6.62	8.02	9.76	12.03	15.08	19.39	25.82
0.6	2.54	4.02	4.92	5.84	6.89	8.14	9.66	11.60	14.14	17.64
0.7	2.26	3.60	4.34	5.03	5.76	6.57	7.49	8.57	9.86	11.46
0.8	1.93	3.13	3.69	4.16	4.61	5.05	5.50	5.95	6.41	6.89
0.9	1.50	2.55	2.94	3.19	3.39	3.53	3.62	3.66	3.64	3.55
1	0.52	1.32	1.47	1.47	1.41	1.31	1.16	0.99	0.80	0.60

N_{cβδ}

$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		4.61	6.32	8.27	10.86	14.55	20.10	28.96	44.20	73.00
0.1		4.38	5.96	7.71	9.96	13.08	17.61	24.60	36.11	56.74
0.2		4.14	5.59	7.12	9.05	11.62	15.23	20.58	28.99	43.24
0.3		3.89	5.19	6.52	8.12	10.18	12.98	16.93	22.82	32.23
0.4		3.61	4.77	5.89	7.19	8.79	10.86	13.64	17.57	23.42
0.5		3.30	4.32	5.25	6.26	7.44	8.89	10.73	13.15	16.50
0.6		2.97	3.85	4.58	5.33	6.14	7.08	8.17	9.51	11.18
0.7		2.61	3.34	3.89	4.39	4.89	5.41	5.96	6.53	7.16
0.8		2.19	2.78	3.15	3.44	3.68	3.88	4.04	4.14	4.19
0.9		1.67	2.11	2.32	2.43	2.47	2.44	2.36	2.22	2.02
1		0.57	0.82	0.85	0.80	0.69	0.56	0.41	0.25	0.10

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		3.30	5.01	6.61	8.58	11.24	15.06	20.87	30.35	47.17
0.1		3.10	4.70	6.14	7.84	10.07	13.16	17.68	24.74	36.60
0.2		2.89	4.37	5.64	7.08	8.90	11.33	14.74	19.80	27.82
0.3		2.67	4.03	5.12	6.32	7.76	9.60	12.07	15.52	20.66
0.4		2.42	3.66	4.59	5.55	6.65	7.98	9.66	11.88	14.93
0.5		2.16	3.28	4.05	4.78	5.58	6.48	7.53	8.82	10.44
0.6		1.87	2.86	3.48	4.02	4.54	5.09	5.66	6.29	6.97
0.7		1.55	2.42	2.89	3.25	3.55	3.81	4.04	4.23	4.36
0.8		1.18	1.93	2.26	2.46	2.58	2.64	2.64	2.57	2.43
0.9		0.73	1.35	1.56	1.63	1.61	1.54	1.41	1.23	1.02
1		0	0.24	0.32	0.29	0.21	0.10	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 50^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$

$\frac{\delta_0}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		1.19	3.79	5.16	6.67	8.58	11.18	14.94	20.73	30.36
0.1		1.04	3.52	4.76	6.06	7.65	9.73	12.61	16.84	23.49
0.2		0.88	3.24	4.34	5.44	6.72	8.33	10.46	13.42	17.78
0.3		0.71	2.95	3.91	4.81	5.82	7.01	8.50	10.45	13.13
0.4		0.52	2.63	3.46	4.18	4.93	5.77	6.74	7.92	9.41
0.5		0.33	2.30	2.99	3.55	4.08	4.62	5.18	5.80	6.49
0.6		0.12	1.94	2.51	2.92	3.26	3.55	3.82	4.05	4.24
0.7		0	1.56	2.02	2.29	2.46	2.58	2.63	2.62	2.54
0.8		0	1.14	1.49	1.64	1.70	1.68	1.61	1.48	1.29
0.9		0	0.65	0.89	0.96	0.93	0.85	0.72	0.57	0.40
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	4.17	6.58	8.86	11.92	16.37	23.22	34.41	53.97	91.31	171.19
0.1	4.02	6.31	8.42	11.17	15.09	20.96	30.27	46.00	74.79	133.32
0.2	3.85	6.03	7.94	10.39	13.78	18.73	26.31	38.65	60.25	101.85
0.3	3.66	5.72	7.45	9.59	12.46	16.53	22.55	31.96	47.66	76.21
0.4	3.46	5.39	6.92	8.75	11.14	14.40	19.03	25.95	36.92	55.69
0.5	3.23	5.03	6.36	7.90	9.81	12.33	15.75	20.62	27.91	39.58
0.6	2.98	4.63	5.77	7.01	8.49	10.34	12.73	15.95	20.46	27.17
0.7	2.69	4.19	5.13	6.08	7.16	8.43	9.96	11.89	14.39	17.81
0.8	2.34	3.69	4.42	5.10	5.81	6.57	7.42	8.38	9.51	10.88
0.9	1.90	3.07	3.59	4.00	4.36	4.70	5.02	5.31	5.58	5.82
1	0.89	1.77	1.98	2.05	2.04	1.99	1.88	1.74	1.56	1.34

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		4.47	6.81	9.32	12.71	17.68	25.46	38.45	62.02	109.50
0.1		4.25	6.44	8.71	11.68	15.93	22.35	32.72	50.74	85.20
0.2		4.02	6.04	8.07	10.64	14.18	19.38	27.44	40.82	65.02
0.3		3.76	5.63	7.40	9.58	12.48	16.56	22.63	32.22	48.58
0.4		3.49	5.19	6.72	8.52	10.82	13.92	18.31	24.89	35.41
0.5		3.19	4.72	6.01	7.45	9.21	11.46	14.48	18.74	25.08
0.6		2.86	4.22	5.28	6.39	7.66	9.20	11.12	13.65	17.12
0.7		2.50	3.69	4.52	5.32	6.17	7.12	8.21	9.51	11.12
0.8		2.08	3.09	3.71	4.23	4.73	5.21	5.69	6.17	6.68
0.9		1.57	2.40	2.80	3.08	3.28	3.41	3.48	3.49	3.43
1		0.49	1.05	1.20	1.22	1.16	1.06	0.91	0.74	0.56

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta_0}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0			4.68	6.98	9.62	13.24	18.61	27.17	41.88	69.75
0.1			4.38	6.48	8.81	11.89	16.30	23.07	34.21	54.21
0.2			4.07	5.96	7.98	10.54	14.09	19.29	27.45	41.30
0.3			3.74	5.43	7.14	9.23	11.98	15.85	21.60	30.77
0.4			3.38	4.88	6.30	7.95	10.01	12.76	16.62	22.35
0.5			3.01	4.31	5.46	6.71	8.18	10.02	12.43	15.74
0.6			2.62	3.72	4.62	5.51	6.49	7.62	8.97	10.65
0.7			2.19	3.11	3.77	4.36	4.94	5.53	6.15	6.81
0.8			1.72	2.46	2.91	3.25	3.52	3.73	3.88	3.97
0.9			1.16	1.72	1.99	2.13	2.18	2.15	2.05	1.89
1			0.08	0.43	0.52	0.50	0.42	0.32	0.19	0.06

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				4.76	6.99	9.68	13.39	18.98	28.05	44.18
0.1				4.37	6.36	8.64	11.68	16.06	22.85	34.27
0.2				3.98	5.71	7.62	10.04	13.37	18.28	26.03
0.3				3.56	5.06	6.62	8.49	10.93	14.31	19.32
0.4				3.14	4.41	5.64	7.03	8.73	10.93	13.95
0.5				2.70	3.76	4.69	5.68	6.78	8.10	9.73
0.6				2.24	3.10	3.79	4.43	5.07	5.75	6.49
0.7				1.77	2.44	2.91	3.28	3.59	3.84	4.04
0.8				1.27	1.78	2.06	2.23	2.31	2.31	2.22
0.9				0.71	1.07	1.21	1.24	1.18	1.07	0.91
1				0	0	0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				1.70	4.68	6.79	9.40	13.03	18.57	27.76
0.1				1.47	4.20	6.02	8.15	10.98	15.07	21.46
0.2				1.23	3.72	5.25	6.95	9.08	11.99	16.23
0.3				0.99	3.24	4.50	5.81	7.36	9.32	11.97
0.4				0.74	2.75	3.77	4.75	5.81	7.04	8.55
0.5				0.49	2.26	3.07	3.76	4.43	5.13	5.88
0.6				0.22	1.77	2.39	2.85	3.23	3.55	3.81
0.7				0	1.28	1.74	2.01	2.18	2.26	2.26
0.8				0	0.79	1.11	1.25	1.28	1.23	1.12
0.9				0	0.27	0.48	0.53	0.50	0.42	0.30
1				0	0	0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		5.95	8.38	11.46	15.87	22.64	33.67	52.98	89.86	168.84
0.1		5.70	7.96	10.73	14.62	20.43	29.62	45.15	73.59	131.48
0.2		5.43	7.50	9.98	13.35	18.24	25.74	37.93	59.28	100.45
0.3		5.14	7.03	9.20	12.07	16.10	22.06	31.36	46.89	75.15
0.4		4.82	6.52	8.39	10.78	14.02	18.61	25.46	36.32	54.91
0.5		4.48	5.98	7.56	9.49	12.00	15.40	20.23	27.46	39.02
0.6		4.11	5.41	6.70	8.20	10.06	12.44	15.64	20.12	26.79
0.7		3.69	4.80	5.81	6.91	8.19	9.73	11.65	14.15	17.55
0.8		3.22	4.12	4.86	5.59	6.37	7.23	8.21	9.34	10.72
0.9		2.63	3.31	3.79	4.19	4.55	4.89	5.20	5.48	5.73
1		1.39	1.76	1.90	1.93	1.90	1.82	1.69	1.52	1.31

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0			5.50	8.29	11.71	16.59	24.17	36.82	59.80	106.17
0.1			5.18	7.73	10.75	14.93	21.21	31.33	48.92	82.61
0.2			4.83	7.14	9.77	13.29	18.38	26.26	39.34	63.04
0.3			4.47	6.54	8.78	11.68	15.70	21.65	31.05	47.09
0.4			4.08	5.91	7.79	10.11	13.18	17.51	23.98	34.32
0.5			3.67	5.27	6.80	8.59	10.84	13.84	18.04	24.30
0.6			3.24	4.60	5.81	7.13	8.69	10.62	13.13	16.58
0.7			2.77	3.90	4.82	5.72	6.71	7.82	9.14	10.76
0.8			2.25	3.16	3.80	4.36	4.89	5.40	5.92	6.45
0.9			1.64	2.33	2.72	2.99	3.13	3.29	3.33	3.30
1			0.45	0.86	0.99	1.00	0.94	0.83	0.68	0.52

$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 30^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				4.93	8.00	11.65	16.88	25.13	39.29	66.17
0.1				4.54	7.30	10.44	14.77	21.32	32.08	51.42
0.2				4.13	6.58	9.24	12.74	17.82	25.73	39.16
0.3				3.71	5.86	8.06	10.82	14.62	20.24	29.17
0.4				3.27	5.14	6.92	9.02	11.76	15.55	21.18
0.5				2.82	4.41	5.81	7.35	9.21	11.62	14.90
0.6				2.36	3.68	4.74	5.81	6.98	8.37	10.07
0.7				1.87	2.95	3.71	4.39	5.05	5.72	6.42
0.8				1.36	2.21	2.72	3.09	3.37	3.59	3.72
0.9				0.78	1.42	1.72	1.86	1.91	1.87	1.75
1				0	0.15	0.26	0.26	0.21	0.12	0.02

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0					4.12	7.47	11.23	16.63	25.30	40.68
0.1					3.68	6.63	9.77	14.06	20.59	31.53
0.2					3.24	5.81	8.37	11.68	16.45	23.94
0.3					2.80	5.00	7.04	9.52	12.86	17.75
0.4					2.35	4.21	5.80	7.58	9.80	12.80
0.5					1.90	3.45	4.64	5.86	7.23	8.91
0.6					1.45	2.72	3.57	4.34	5.11	5.92
0.7					1.00	2.01	2.59	3.03	3.38	3.66
0.8					0.55	1.33	1.69	1.90	1.99	1.99
0.9					0.07	0.64	0.85	0.91	0.88	0.77
1					0	0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0						2.50	6.67	10.40	15.74	24.45
0.1						2.12	5.74	8.73	12.74	18.88
0.2						1.74	4.84	7.18	10.11	14.26
0.3						1.36	3.99	5.77	7.82	10.48
0.4						1.00	3.20	4.51	5.88	7.47
0.5						0.66	2.45	3.39	4.24	5.10
0.6						0.33	1.77	2.41	2.89	3.27
0.7						0.02	1.15	1.56	1.79	1.90
0.8						0	0.59	0.83	0.92	0.90
0.9						0	0.06	0.21	0.23	0.18
1						0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		5.12	7.84	10.96	15.34	22.02	32.90	51.94	88.35	166.42
0.1		4.88	7.43	10.26	14.13	19.87	28.94	44.27	72.36	129.59
0.2		4.63	7.00	9.53	12.90	17.74	25.14	37.18	58.29	99.01
0.3		4.36	6.54	8.78	11.65	15.65	21.54	30.74	46.10	74.07
0.4		4.07	6.06	8.00	10.40	13.62	18.17	24.95	35.71	54.12
0.5		3.75	5.55	7.20	9.15	11.65	15.03	19.82	26.98	38.45
0.6		3.40	5.00	6.37	7.90	9.76	12.14	15.32	19.77	26.39
0.7		3.02	4.41	5.51	6.64	7.94	9.48	11.41	13.90	17.29
0.8		2.58	3.76	4.59	5.36	6.17	7.04	8.03	9.17	10.56
0.9		2.03	3.00	3.56	4.00	4.39	4.75	5.07	5.37	5.63
1		0.88	1.51	1.73	1.81	1.81	1.74	1.63	1.48	1.28

$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 20^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				6.93	10.51	15.34	22.73	35.04	57.40	102.62
0.1				6.44	9.63	13.79	19.95	29.81	46.95	79.84
0.2				5.92	8.74	12.26	17.27	24.98	37.75	60.92
0.3				5.39	7.84	10.76	14.74	20.58	29.78	45.50
0.4				4.84	6.93	9.30	12.37	16.64	22.99	33.16
0.5				4.28	6.03	7.89	10.16	13.14	17.29	23.47
0.6				3.69	5.12	6.53	8.12	10.07	12.58	16.00
0.7				3.08	4.21	5.22	6.25	7.40	8.74	10.37
0.8				2.43	3.29	3.95	4.53	5.10	5.65	6.21
0.9				1.70	2.30	2.67	2.92	3.08	3.16	3.16
1				0.42	0.72	0.81	0.80	0.73	0.62	0.47

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0					5.23	9.52	14.74	22.70	36.29	62.10
0.1					4.72	8.50	12.87	19.25	29.62	48.24
0.2					4.20	7.50	11.08	16.06	23.74	36.73
0.3					3.67	6.51	9.39	13.17	18.65	27.34
0.4					3.14	5.54	7.80	10.56	14.32	19.84
0.5					2.62	4.61	6.32	8.25	10.68	13.94
0.6					2.09	3.71	4.96	6.23	7.67	9.40
0.7					1.56	2.85	3.71	4.47	5.22	5.98
0.8					1.02	2.01	2.56	2.95	3.24	3.45
0.9					0.45	1.17	1.48	1.62	1.66	1.59
1					0	0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$\beta = 40^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0							7.84	13.41	21.74	36.29
0.1							6.77	11.30	17.67	28.11
0.2							5.74	9.36	14.08	21.32
0.3							4.77	7.58	10.98	15.79
0.4							3.86	5.99	8.34	11.36
0.5							3.01	4.58	6.12	7.88
0.6							2.23	3.34	4.28	5.20
0.7							1.52	2.27	2.79	3.18
0.8							0.86	1.34	1.59	1.69
0.9							0.25	0.54	0.63	0.61
1							0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0								3.98	11.26	19.67
0.1								3.23	9.07	15.15
0.2								2.54	7.13	11.40
0.3										
0.4								1.91	5.46	8.34
0.5								1.35	4.03	5.90
								0.86	2.84	3.98
0.6										
0.7								0.43	1.85	2.50
0.8								0.07	1.05	1.39
								0	0.42	0.59
0.9								0	0	0
1								0	0	0

N_{cβδ}

$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$

δ° / Φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		3.10	7.20	10.41	14.77	21.37	32.10	50.87	86.81	163.94
0.1		2.91	6.82	9.74	13.60	19.28	28.23	43.35	71.09	127.66
0.2		2.71	6.41	9.04	12.41	17.21	24.52	36.41	57.26	97.52
0.3		2.49	5.98	8.32	11.20	15.18	21.01	30.10	45.28	72.96
0.4		2.25	5.52	7.57	9.99	13.20	17.71	24.43	35.07	53.30
0.5		1.99	5.04	6.80	8.78	11.29	14.65	19.40	26.50	37.87
0.6		1.71	4.52	6.00	7.57	9.44	11.82	14.99	19.41	25.99
0.7		1.39	3.96	5.17	6.36	7.67	9.23	11.15	13.64	17.02
0.8		1.04	3.35	4.29	5.12	5.95	6.85	7.84	9.00	10.39
0.9		0.59	2.63	3.30	3.80	4.23	4.60	4.95	5.26	5.54
1		0	1.23	1.55	1.68	1.71	1.67	1.57	1.43	1.25

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				3.76	8.97	13.87	21.11	33.07	54.78	98.78
0.1				3.43	8.20	12.46	18.51	28.12	44.80	76.85
0.2				3.08	7.42	11.06	16.02	23.55	36.01	58.63
0.3				2.73	6.63	9.69	13.65	19.40	28.40	43.78
0.4				2.36	5.83	8.35	11.44	15.67	21.92	31.89
0.5				1.98	5.04	7.06	9.38	12.36	16.47	22.56
0.6				1.58	4.24	5.82	7.48	9.45	11.97	15.38
0.7				1.17	3.44	4.62	5.73	6.93	8.30	9.96
0.8				0.73	2.63	3.46	4.13	4.75	5.35	5.95
0.9				0.25	1.76	2.29	2.63	2.85	2.97	3.01
1				0	0.37	0.59	0.65	0.63	0.54	0.42

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0						4.60	11.78	19.64	32.65	57.28
0.1						4.03	10.26	16.63	26.63	44.48
0.2						3.46	8.80	13.85	21.33	33.85
0.3						2.90	7.41	11.32	16.74	25.19
0.4						2.36	6.11	9.06	12.82	18.26
0.5						1.84	4.91	7.04	9.54	12.81
0.6						1.33	3.79	5.28	6.82	8.62
0.7						0.84	2.77	3.74	4.61	5.46
0.8						0.38	1.83	2.42	2.83	3.12
0.9						0	0.95	1.26	1.40	1.41
1						0	0	0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0								5.74	16.38	30.25
0.1								4.74	13.27	23.40
0.2								3.81	10.53	17.72
0.3								2.97	8.16	13.08
0.4								2.22	6.14	9.37
0.5								1.55	4.44	6.46
0.6								0.96	3.04	4.22
0.7								0.46	1.90	2.53
0.8								0.03	0.98	1.28
0.9								0	0.25	0.38
1								0	0	0

$N_{c\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0										7.40
0.1										5.58
0.2										4.08
0.3										2.85
0.4										1.86
0.5										1.10
0.6										0.52
0.7										0.09
0.8										0
0.9										0
1										0

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta_0}{\beta} \Phi$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.49	2.28	3.53	5.55	8.92	14.81	25.67	47.16	93.68	207.27
0.1	1.48	2.23	3.41	5.26	8.30	13.47	22.71	40.35	76.92	161.64
0.2	1.46	2.18	3.27	4.97	7.67	12.14	19.87	34.06	62.16	123.73
0.3	1.44	2.12	3.13	4.66	7.04	10.84	17.18	28.34	49.38	92.83
0.4	1.42	2.06	2.99	4.35	6.40	9.57	14.66	23.21	38.49	68.11
0.5	1.40	1.99	2.83	4.02	5.76	8.34	12.31	18.65	29.34	48.69
0.6	1.38	1.92	2.66	3.69	5.12	7.16	10.15	14.65	21.78	33.75
0.7	1.35	1.84	2.48	3.34	4.48	6.03	8.16	11.18	15.62	22.47
0.8	1.32	1.74	2.28	2.97	3.83	4.92	6.34	8.18	10.67	14.12
0.9	1.27	1.63	2.05	2.55	3.13	3.82	4.62	5.56	6.68	8.02
1	1.18	1.39	1.60	1.81	2.02	2.21	2.37	2.51	2.60	2.63

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.38	2.05	3.07	4.66	7.23	11.55	19.19	33.57	63.05	130.47
0.1	1.37	2.00	2.96	4.42	6.73	10.50	16.97	28.72	51.77	101.74
0.2	1.35	1.96	2.84	4.17	6.22	9.47	14.85	24.25	41.83	77.88
0.3	1.34	1.90	2.72	3.92	5.70	8.45	12.84	20.18	33.23	58.43
0.4	1.32	1.85	2.59	3.65	5.19	7.46	10.95	16.52	25.90	42.87
0.5	1.30	1.79	2.46	3.38	4.67	6.51	9.20	13.28	19.75	30.65
0.6	1.27	1.72	2.31	3.10	4.15	5.59	7.58	10.43	14.66	21.24
0.7	1.25	1.65	2.16	2.80	3.63	4.70	6.10	7.96	10.51	14.14
0.8	1.22	1.56	1.98	2.49	3.10	3.84	4.73	5.82	7.18	8.89
0.9	1.18	1.46	1.78	2.14	2.54	2.98	3.45	3.96	4.49	5.05
1	1.09	1.24	1.39	1.52	1.63	1.72	1.77	1.78	1.75	1.65

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.23	1.77	2.57	3.78	5.66	8.70	13.85	23.08	40.98	79.32
0.1	1.22	1.74	2.48	3.59	5.27	7.91	12.25	19.75	33.65	61.85
0.2	1.21	1.69	2.39	3.39	4.87	7.13	10.72	16.67	27.19	47.35
0.3	1.19	1.65	2.28	3.18	4.47	6.37	9.26	13.87	21.60	35.52
0.4	1.18	1.60	2.18	2.96	4.06	5.62	7.90	11.36	16.84	26.06
0.5	1.16	1.55	2.06	2.74	3.66	4.90	6.64	9.13	12.83	18.63
0.6	1.14	1.49	1.94	2.51	3.25	4.21	5.47	7.17	9.53	12.91
0.7	1.12	1.43	1.81	2.28	2.84	3.54	4.40	5.47	6.83	8.59
0.8	1.09	1.36	1.67	2.02	2.43	2.89	3.41	4.00	4.66	5.40
0.9	1.05	1.27	1.49	1.74	1.99	2.24	2.49	2.72	2.92	3.07
1	0.97	1.08	1.16	1.23	1.28	1.29	1.28	1.22	1.13	1.01

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.06	1.48	2.07	2.94	4.25	6.29	9.59	15.23	25.57	46.28
0.1	1.05	1.44	2.00	2.79	3.96	5.72	8.48	13.03	20.99	36.09
0.2	1.04	1.41	1.92	2.64	3.66	5.16	7.42	11.00	16.96	27.63
0.3	1.02	1.37	1.84	2.48	3.36	4.60	6.42	9.15	13.48	20.73
0.4	1.01	1.33	1.75	2.31	3.05	4.06	5.47	7.49	10.50	15.20
0.5	0.99	1.29	1.66	2.14	2.75	3.54	4.60	6.02	8.01	10.87
0.6	0.98	1.24	1.56	1.96	2.44	3.04	3.79	4.73	5.94	7.53
0.7	0.96	1.19	1.46	1.77	2.14	2.56	3.05	3.61	4.26	5.01
0.8	0.93	1.13	1.34	1.57	1.82	2.09	2.36	2.64	2.91	3.15
0.9	0.90	1.05	1.20	1.35	1.49	1.62	1.72	1.79	1.82	1.79
1	0.83	0.89	0.94	0.96	0.96	0.94	0.89	0.81	0.72	0.61

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	0.86	1.16	1.58	2.17	3.03	4.31	6.30	9.53	15.13	25.62
0.1	0.85	1.14	1.53	2.06	2.82	3.92	5.57	8.16	12.42	19.98
0.2	0.84	1.11	1.47	1.95	2.61	3.54	4.88	6.89	10.04	15.29
0.3	0.83	1.08	1.40	1.83	2.39	3.16	4.21	5.73	7.97	11.47
0.4	0.82	1.05	1.34	1.70	2.17	2.79	3.60	4.69	6.21	8.41
0.5	0.81	1.01	1.27	1.58	1.96	2.43	3.02	3.77	4.74	6.01
0.6	0.79	0.98	1.19	1.45	1.74	2.08	2.49	2.96	3.51	4.17
0.7	0.78	0.94	1.11	1.31	1.52	1.75	2.00	2.26	2.52	2.77
0.8	0.76	0.89	1.02	1.16	1.30	1.43	1.55	1.65	1.72	1.75
0.9	0.73	0.83	0.92	1.00	1.06	1.11	1.13	1.12	1.08	1.01
1	0.68	0.70	0.72	0.71	0.69	0.65	0.59	0.52	0.44	0.36

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$$

$\frac{\delta_0}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.43	2.21	3.43	5.40	8.71	14.50	25.20	46.39	92.31	204.62
0.1	1.42	2.16	3.31	5.13	8.11	13.19	22.29	39.68	75.79	159.56
0.2	1.40	2.11	3.18	4.84	7.50	11.89	19.51	33.50	61.25	122.14
0.3	1.39	2.06	3.04	4.54	6.88	10.61	16.86	27.88	48.66	91.64
0.4	1.37	2.00	2.90	4.24	6.25	9.37	14.39	22.82	37.92	67.23
0.5	1.35	1.93	2.75	3.92	5.63	8.17	12.08	18.34	28.91	48.07
0.6	1.32	1.86	2.59	3.59	5.00	7.02	9.96	14.41	21.46	33.31
0.7	1.30	1.78	2.41	3.25	4.38	5.90	8.01	11.00	15.39	22.18
0.8	1.27	1.69	2.22	2.89	3.74	4.82	6.22	8.05	10.51	13.94
0.9	1.22	1.58	1.99	2.48	3.06	3.74	4.53	5.47	6.58	7.92
1	1.13	1.34	1.55	1.76	1.97	2.16	2.33	2.46	2.56	2.60

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.24	1.90	2.88	4.41	6.89	11.06	18.46	32.45	61.19	127.09
0.1	1.23	1.86	2.78	4.19	6.41	10.06	16.33	27.76	50.23	99.11
0.2	1.21	1.82	2.67	3.95	5.93	9.07	14.29	23.44	40.60	75.87
0.3	1.20	1.77	2.56	3.71	5.44	8.10	12.36	19.50	32.25	56.92
0.4	1.18	1.72	2.44	3.46	4.94	7.15	10.54	15.97	25.13	41.76
0.5	1.16	1.66	2.31	3.20	4.45	6.23	8.85	12.83	19.16	29.86
0.6	1.14	1.60	2.17	2.93	3.96	5.35	7.30	10.08	14.22	20.69
0.7	1.12	1.53	2.03	2.66	3.46	4.50	5.87	7.69	10.20	13.77
0.8	1.09	1.45	1.87	2.36	2.96	3.68	4.56	5.63	6.97	8.66
0.9	1.06	1.36	1.68	2.03	2.42	2.85	3.32	3.82	4.36	4.92
1	0.98	1.15	1.31	1.44	1.56	1.65	1.70	1.72	1.69	1.61

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		1.57	2.33	3.47	5.25	8.14	13.05	21.91	39.14	76.21
0.1		1.53	2.25	3.29	4.89	7.40	11.54	18.74	32.14	59.43
0.2		1.49	2.16	3.11	4.52	6.67	10.10	15.82	25.97	45.49
0.3		1.46	2.07	2.92	4.14	5.96	8.73	13.17	20.63	34.13
0.4		1.41	1.97	2.72	3.77	5.26	7.45	10.78	16.08	25.04
0.5		1.37	1.87	2.52	3.39	4.58	6.26	8.66	12.26	17.90
0.6		1.32	1.76	2.31	3.01	3.94	5.16	6.81	9.10	12.40
0.7		1.26	1.64	2.09	2.64	3.31	4.15	5.19	6.52	8.26
0.8		1.20	1.51	1.85	2.25	2.70	3.22	3.80	4.45	5.19
0.9		1.12	1.35	1.59	1.84	2.10	2.35	2.58	2.79	2.95
1		0.95	1.05	1.13	1.19	1.21	1.20	1.16	1.08	0.97

N_{qβδ}

$\beta = 40^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		1.21	1.79	2.61	3.83	5.73	8.84	14.18	24.02	43.83
0.1		1.18	1.73	2.47	3.56	5.22	7.82	12.13	19.72	34.18
0.2		1.15	1.66	2.33	3.29	4.70	6.84	10.24	15.93	26.16
0.3		1.12	1.59	2.19	3.02	4.20	5.92	8.52	12.66	19.63
0.4		1.09	1.51	2.04	2.75	3.71	5.05	6.98	9.86	14.40
0.5		1.05	1.43	1.89	2.47	3.23	4.24	5.61	7.52	10.29
0.6		1.01	1.35	1.73	2.20	2.77	3.49	4.40	5.58	7.13
0.7		0.97	1.26	1.57	1.92	2.33	2.81	3.36	4.00	4.75
0.8		0.92	1.16	1.39	1.64	1.91	2.18	2.46	2.73	2.98
0.9		0.86	1.04	1.20	1.34	1.48	1.59	1.67	1.71	1.70
1		0.73	0.81	0.85	0.87	0.85	0.82	0.76	0.68	0.58

$N_{q\beta\delta}$

$\beta = 50^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.2$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		0.77	1.29	1.85	2.64	3.82	5.67	8.70	13.97	23.90
0.1		0.76	1.25	1.75	2.46	3.48	5.02	7.44	11.47	18.64
0.2		0.74	1.20	1.65	2.27	3.13	4.39	6.28	9.27	14.27
0.3		0.72	1.15	1.55	2.08	2.80	3.79	5.23	7.36	10.70
0.4		0.70	1.09	1.45	1.89	2.47	3.24	4.28	5.73	7.85
0.5		0.68	1.03	1.34	1.70	2.15	2.72	3.44	4.37	5.61
0.6		0.65	0.97	1.23	1.51	1.85	2.24	2.70	3.24	3.89
0.7		0.62	0.91	1.11	1.32	1.55	1.80	2.06	2.33	2.59
0.8		0.60	0.84	0.99	1.13	1.27	1.40	1.51	1.59	1.63
0.9		0.56	0.75	0.85	0.93	0.99	1.02	1.03	1.00	0.95
1		0.49	0.59	0.61	0.60	0.58	0.54	0.48	0.42	0.34

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.34	2.12	3.32	5.25	8.50	14.19	24.71	45.59	90.91	201.91
0.1	1.33	2.08	3.20	4.98	7.91	12.90	21.86	39.00	74.64	157.45
0.2	1.31	2.03	3.08	4.71	7.31	11.63	19.13	32.92	60.32	120.53
0.3	1.30	1.97	2.95	4.42	6.71	10.38	16.54	27.39	47.92	90.43
0.4	1.28	1.92	2.81	4.12	6.10	9.17	14.11	22.43	37.35	66.34
0.5	1.26	1.85	2.66	3.81	5.49	7.99	11.85	18.03	28.47	47.43
0.6	1.24	1.78	2.50	3.49	4.88	6.86	9.76	14.16	21.14	32.87
0.7	1.21	1.71	2.33	3.16	4.27	5.77	7.85	10.81	15.16	21.89
0.8	1.18	1.62	2.15	2.81	3.65	4.72	6.10	7.91	10.35	13.76
0.9	1.14	1.51	1.93	2.41	2.99	3.66	4.45	5.37	6.48	7.82
1	1.06	1.29	1.50	1.72	1.92	2.11	2.28	2.42	2.52	2.56

$N_{\alpha\beta\delta}$

$\beta = 20^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		1.68	2.65	4.12	6.51	10.53	17.69	31.26	59.22	123.57
0.1		1.64	2.56	3.91	6.06	9.58	15.65	26.74	48.62	96.36
0.2		1.60	2.46	3.70	5.60	8.63	13.69	22.57	39.29	73.76
0.3		1.56	2.35	3.47	5.13	7.71	11.84	18.78	31.22	55.34
0.4		1.51	2.24	3.23	4.67	6.81	10.10	15.38	24.33	40.60
0.5		1.46	2.12	2.99	4.20	5.93	8.48	12.36	18.55	29.03
0.6		1.41	2.00	2.74	3.74	5.09	6.99	9.71	13.77	20.12
0.7		1.35	1.86	2.48	3.27	4.28	5.62	7.41	9.87	13.39
0.8		1.28	1.72	2.21	2.79	3.50	4.36	5.42	6.74	8.42
0.9		1.20	1.54	1.90	2.29	2.71	3.18	3.68	4.22	4.78
1		1.02	1.20	1.35	1.47	1.57	1.63	1.66	1.64	1.57

N_{qβδ}

$\beta = 30^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0			1.95	3.06	4.75	7.49	12.15	20.61	37.14	72.86
0.1			1.88	2.91	4.42	6.81	10.75	17.63	30.49	56.82
0.2			1.81	2.74	4.09	6.14	9.41	14.88	24.64	43.49
0.3			1.73	2.57	3.75	5.48	8.13	12.38	19.57	32.63
0.4			1.65	2.40	3.41	4.84	6.94	10.14	15.26	23.94
0.5			1.56	2.22	3.07	4.22	5.83	8.15	11.63	17.11
0.6			1.47	2.04	2.73	3.62	4.80	6.40	8.63	11.86
0.7			1.37	1.84	2.39	3.04	3.86	4.88	6.19	7.89
0.8			1.26	1.64	2.04	2.49	3.00	3.57	4.23	4.96
0.9			1.13	1.41	1.67	1.93	2.18	2.43	2.64	2.82
1			0.88	1.00	1.07	1.11	1.12	1.09	1.03	0.93

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				2.09	3.26	5.04	7.95	12.96	22.26	41.10
0.1				1.98	3.03	4.59	7.03	11.09	18.27	32.05
0.2				1.87	2.80	4.13	6.15	9.36	14.77	24.53
0.3				1.76	2.57	3.69	5.32	7.79	11.73	18.41
0.4				1.64	2.34	3.26	4.53	6.38	9.14	13.50
0.5				1.51	2.10	2.84	3.81	5.12	6.97	9.65
0.6				1.39	1.87	2.44	3.14	4.02	5.17	6.69
0.7				1.26	1.64	2.05	2.52	3.07	3.71	4.45
0.8				1.12	1.40	1.67	1.96	2.25	2.53	2.80
0.9				0.96	1.14	1.30	1.43	1.53	1.58	1.59
1				0.69	0.74	0.75	0.74	0.70	0.63	0.55

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.4$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				1.04	2.04	3.16	4.87	7.67	12.58	21.90
0.1				0.98	1.90	2.87	4.31	6.56	10.33	17.08
0.2				0.93	1.76	2.59	3.77	5.54	8.35	13.07
0.3				0.87	1.61	2.31	3.26	4.61	6.63	9.81
0.4				0.81	1.46	2.04	2.78	3.77	5.17	7.19
0.5				0.75	1.32	1.78	2.33	3.03	3.94	5.14
0.6				0.69	1.17	1.53	1.92	2.38	2.92	3.56
0.7				0.63	1.02	1.28	1.54	1.82	2.09	2.37
0.8				0.56	0.88	1.05	1.20	1.33	1.43	1.50
0.9				0.49	0.72	0.82	0.88	0.91	0.91	0.87
1				0.37	0.48	0.49	0.47	0.43	0.38	0.32

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		2.01	3.19	5.09	8.27	13.85	24.20	44.76	89.48	199.14
0.1		1.97	3.08	4.83	7.70	12.60	21.41	38.29	73.46	155.30
0.2		1.92	2.96	4.56	7.11	11.36	18.73	32.33	59.37	118.88
0.3		1.87	2.84	4.28	6.53	10.14	16.19	26.90	47.16	89.19
0.4		1.82	2.70	3.99	5.93	8.95	13.82	22.02	36.76	65.43
0.5		1.76	2.56	3.69	5.34	7.81	11.60	17.70	28.02	46.78
0.6		1.69	2.41	3.38	4.75	6.70	9.56	13.91	20.80	32.42
0.7		1.62	2.25	3.06	4.15	5.64	7.69	10.61	14.92	21.59
0.8		1.54	2.07	2.72	3.55	4.61	5.97	7.77	10.19	13.57
0.9		1.44	1.86	2.34	2.91	3.57	4.35	5.28	6.38	7.71
1		1.22	1.45	1.66	1.87	2.06	2.24	2.38	2.48	2.53

N_{αβδ}

$\beta = 20^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0			2.32	3.77	6.07	9.94	16.84	29.97	57.13	119.84
0.1			2.24	3.58	5.65	9.04	14.90	25.64	46.91	93.46
0.2			2.15	3.38	5.22	8.15	13.03	21.65	37.91	71.54
0.3			2.06	3.17	4.79	7.27	11.27	18.01	30.12	53.67
0.4			1.96	2.96	4.35	6.42	9.61	14.75	23.47	39.38
0.5			1.86	2.74	3.92	5.60	8.07	11.85	17.89	28.15
0.6			1.75	2.51	3.48	4.81	6.65	9.31	13.28	19.51
0.7			1.63	2.27	3.05	4.04	5.35	7.11	9.53	12.99
0.8			1.50	2.02	2.60	3.30	4.15	5.20	6.50	8.16
0.9			1.35	1.73	2.13	2.56	3.03	3.53	4.07	4.64
1			1.05	1.23	1.37	1.48	1.55	1.59	1.58	1.52

$N_{\alpha\beta\delta}$

$\beta = 30^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				2.42	4.09	6.69	11.10	19.12	34.89	69.16
0.1				2.29	3.81	6.08	9.82	16.36	28.65	53.93
0.2				2.16	3.52	5.48	8.59	13.81	23.15	41.28
0.3				2.03	3.23	4.89	7.43	11.49	18.39	30.97
0.4				1.89	2.94	4.32	6.34	9.41	14.33	22.72
0.5				1.75	2.64	3.77	5.32	7.56	10.93	16.25
0.6				1.61	2.35	3.23	4.38	5.94	8.11	11.26
0.7				1.45	2.06	2.72	3.53	4.53	5.82	7.49
0.8				1.29	1.76	2.22	2.74	3.32	3.97	4.71
0.9				1.11	1.44	1.72	1.99	2.25	2.48	2.67
1				0.79	0.93	1.00	1.02	1.02	0.97	0.88

$N_{\alpha\beta\delta}$

$\beta = 40^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0					2.23	4.07	6.79	11.46	20.15	37.90
0.1					2.08	3.70	6.00	9.80	16.54	29.55
0.2					1.92	3.33	5.25	8.27	13.37	22.62
0.3					1.76	2.97	4.54	6.88	10.62	16.97
0.4					1.60	2.63	3.87	5.63	8.27	12.45
0.5					1.44	2.29	3.25	4.53	6.31	8.90
0.6					1.28	1.96	2.68	3.56	4.68	6.17
0.7					1.12	1.65	2.15	2.71	3.36	4.10
0.8					0.96	1.35	1.67	1.98	2.29	2.58
0.9					0.79	1.05	1.22	1.35	1.44	1.47
1					0.52	0.62	0.64	0.62	0.58	0.51

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.6$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0						1.57	3.64	6.25	10.76	19.37
0.1						1.43	3.22	5.35	8.83	15.11
0.2						1.28	2.82	4.51	7.14	11.56
0.3						1.15	2.44	3.75	5.67	8.67
0.4						1.01	2.08	3.07	4.42	6.36
0.5						0.88	1.74	2.47	3.37	4.55
0.6						0.76	1.44	1.94	2.50	3.15
0.7						0.65	1.16	1.48	1.79	2.10
0.8						0.54	0.90	1.09	1.23	1.33
0.9						0.43	0.67	0.75	0.79	0.78
1						0.27	0.36	0.36	0.34	0.29

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 10^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		1.87	3.05	4.91	8.03	13.50	23.67	43.91	88.00	196.31
0.1		1.83	2.94	4.66	7.47	12.28	20.94	37.56	72.25	153.08
0.2		1.79	2.83	4.40	6.90	11.07	18.32	31.71	58.39	117.18
0.3		1.74	2.71	4.13	6.33	9.88	15.84	26.39	46.38	87.92
0.4		1.69	2.58	3.85	5.76	8.73	13.51	21.61	36.15	64.50
0.5		1.63	2.45	3.56	5.18	7.61	11.35	17.36	27.56	46.12
0.6		1.57	2.30	3.26	4.61	6.53	9.35	13.64	20.46	31.96
0.7		1.50	2.15	2.96	4.03	5.49	7.52	10.41	14.67	21.28
0.8		1.43	1.97	2.63	3.45	4.49	5.84	7.62	10.02	13.37
0.9		1.33	1.77	2.26	2.82	3.48	4.26	5.18	6.27	7.60
1		1.13	1.38	1.60	1.81	2.01	2.19	2.33	2.44	2.49

$N_{q\beta\delta}$

$\beta = 20^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				3.31	5.54	9.26	15.90	28.57	54.88	115.87
0.1				3.14	5.16	8.42	14.06	24.44	45.06	90.36
0.2				2.96	4.77	7.59	12.30	20.63	36.41	69.16
0.3				2.78	4.37	6.78	10.64	17.17	28.93	51.89
0.4				2.59	3.97	5.98	9.07	14.06	22.55	38.07
0.5				2.40	3.58	5.22	7.62	11.30	17.19	27.22
0.6				2.20	3.18	4.48	6.28	8.88	12.76	18.86
0.7				1.99	2.78	3.77	5.05	6.77	9.15	12.56
0.8				1.77	2.38	3.08	3.92	4.96	6.25	7.89
0.9				1.52	1.95	2.39	2.86	3.37	3.91	4.48
1				1.08	1.25	1.38	1.47	1.52	1.52	1.47

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0					2.97	5.63	9.80	17.36	32.29	64.95
0.1					2.77	5.12	8.67	14.85	26.51	50.65
0.2					2.56	4.61	7.58	12.54	21.43	38.77
0.3					2.35	4.12	6.56	10.43	17.02	29.09
0.4					2.13	3.63	5.59	8.54	13.26	21.34
0.5					1.92	3.17	4.70	6.86	10.11	15.26
0.6					1.71	2.72	3.87	5.39	7.51	10.57
0.7					1.49	2.29	3.11	4.11	5.38	7.04
0.8					1.27	1.87	2.42	3.01	3.67	4.42
0.9					1.04	1.45	1.76	2.04	2.30	2.51
1					0.68	0.84	0.91	0.92	0.90	0.83

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0							4.97	9.39	17.42	33.90
0.1							4.40	8.03	14.30	26.43
0.2							3.85	6.78	11.55	20.23
0.3							3.32	5.64	9.18	15.18
0.4							2.83	4.62	7.15	11.14
0.5							2.38	3.71	5.45	7.96
0.6							1.96	2.91	4.05	5.52
0.7							1.58	2.22	2.90	3.67
0.8							1.22	1.63	1.98	2.31
0.9							0.90	1.11	1.24	1.32
1							0.48	0.52	0.51	0.46

$N_{q\beta\delta}$

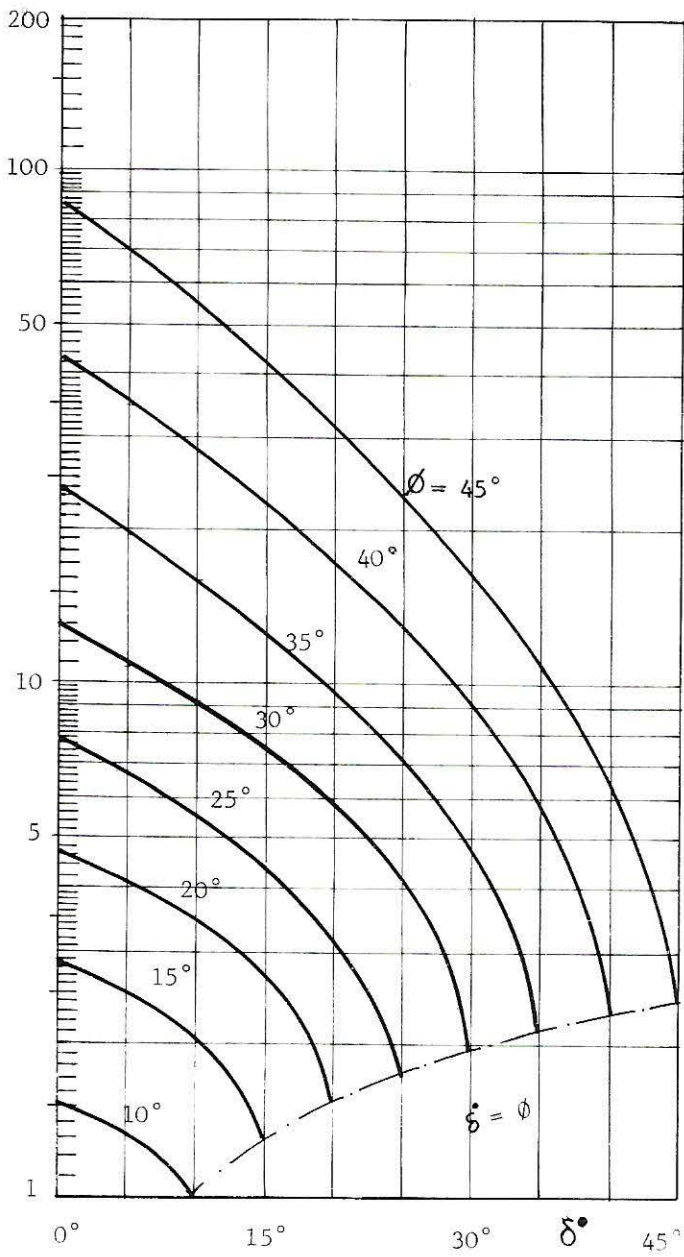
$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 0.8$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0								2.79	7.88	15.71
0.1								2.38	6.47	12.25
0.2								2.01	5.23	9.38
0.3								1.67	4.15	7.03
0.4								1.37	3.23	5.16
0.5								1.10	2.46	3.69
0.6								0.87	1.83	2.55
0.7								0.68	1.32	1.71
0.8								0.51	0.91	1.09
0.9								0.36	0.59	0.65
1								0.19	0.26	0.25

$N_{\alpha\beta\delta}$

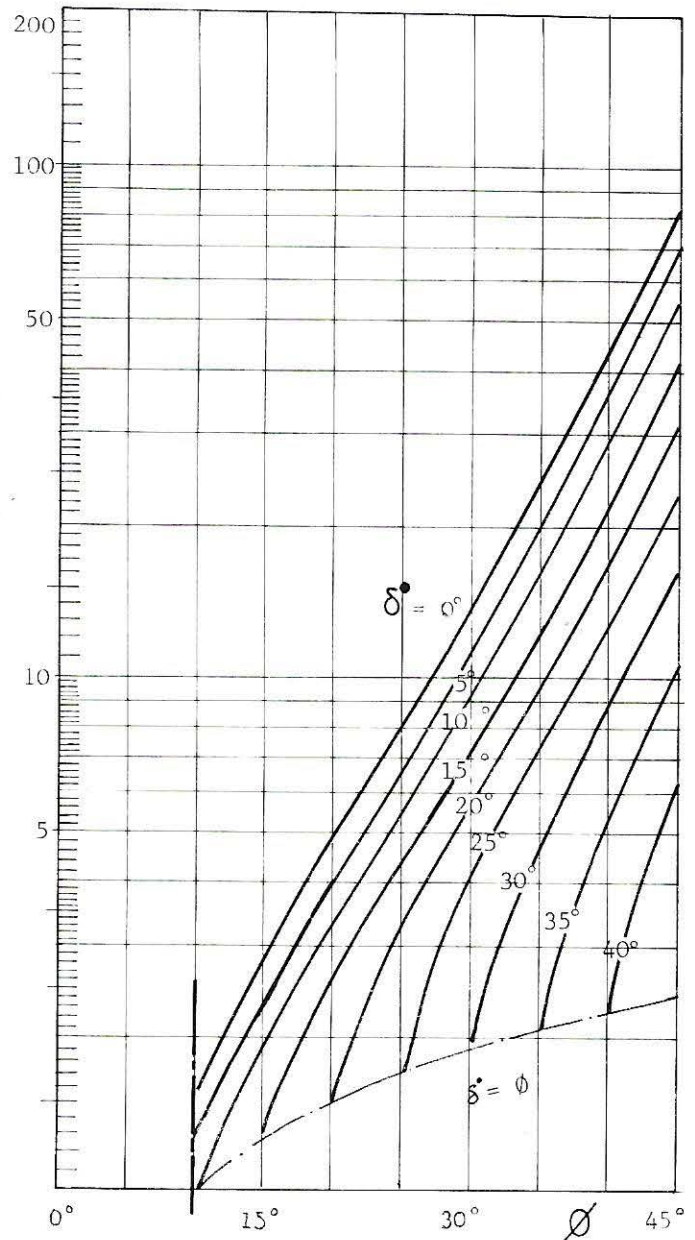
$\beta = 10^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 1$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0		1.52	2.88	4.71	7.76	13.13	23.12	43.02	86.47	193.39
0.1		1.49	2.78	4.47	7.23	11.94	20.45	36.81	71.00	150.81
0.2		1.45	2.67	4.22	6.68	10.77	17.89	31.07	57.38	115.44
0.3		1.41	2.56	3.96	6.13	9.61	15.47	25.86	45.58	86.61
0.4		1.37	2.44	3.69	5.57	8.49	13.20	21.17	35.52	63.55
0.5		1.33	2.31	3.42	5.02	7.40	11.08	17.01	27.08	45.43
0.6		1.28	2.17	3.13	4.46	6.35	9.13	13.37	20.10	31.49
0.7		1.22	2.03	2.84	3.90	5.34	7.35	10.20	14.42	20.96
0.8		1.16	1.87	2.52	3.33	4.37	5.70	7.47	9.85	13.18
0.9		1.08	1.67	2.17	2.73	3.39	4.16	5.07	6.16	7.49
1		0.92	1.30	1.54	1.75	1.96	2.14	2.29	2.40	2.45



N
 $q\beta\delta$

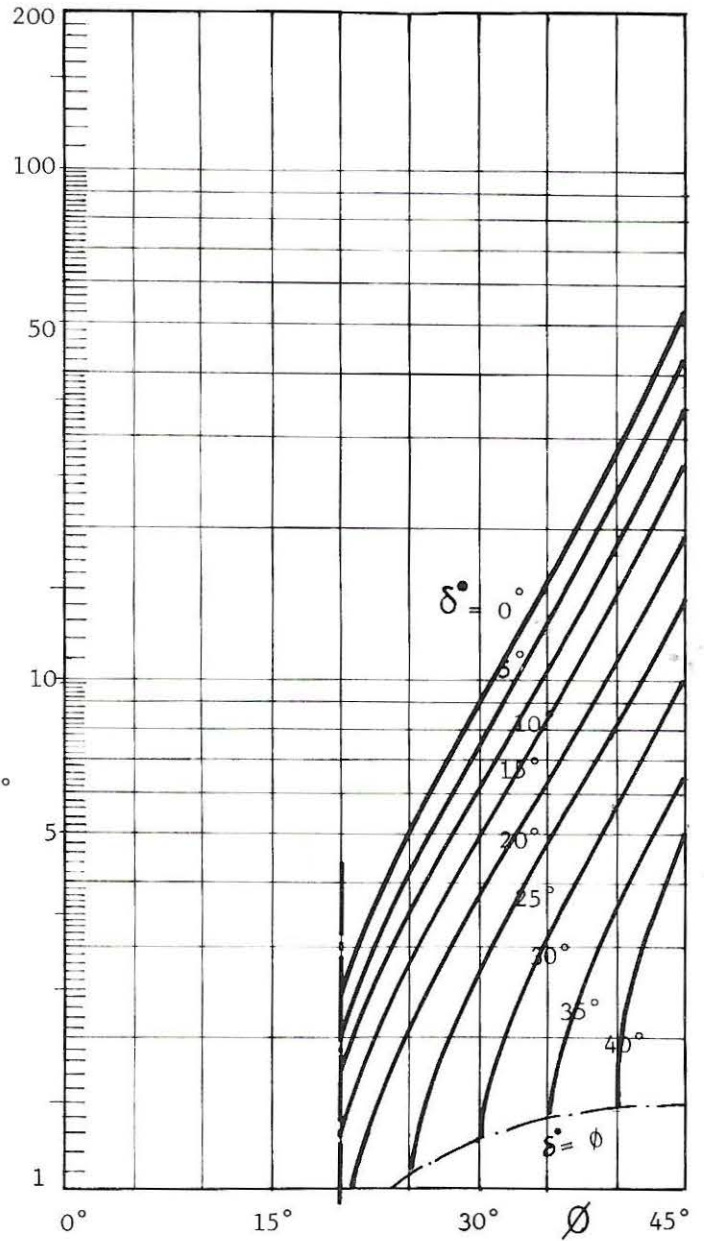
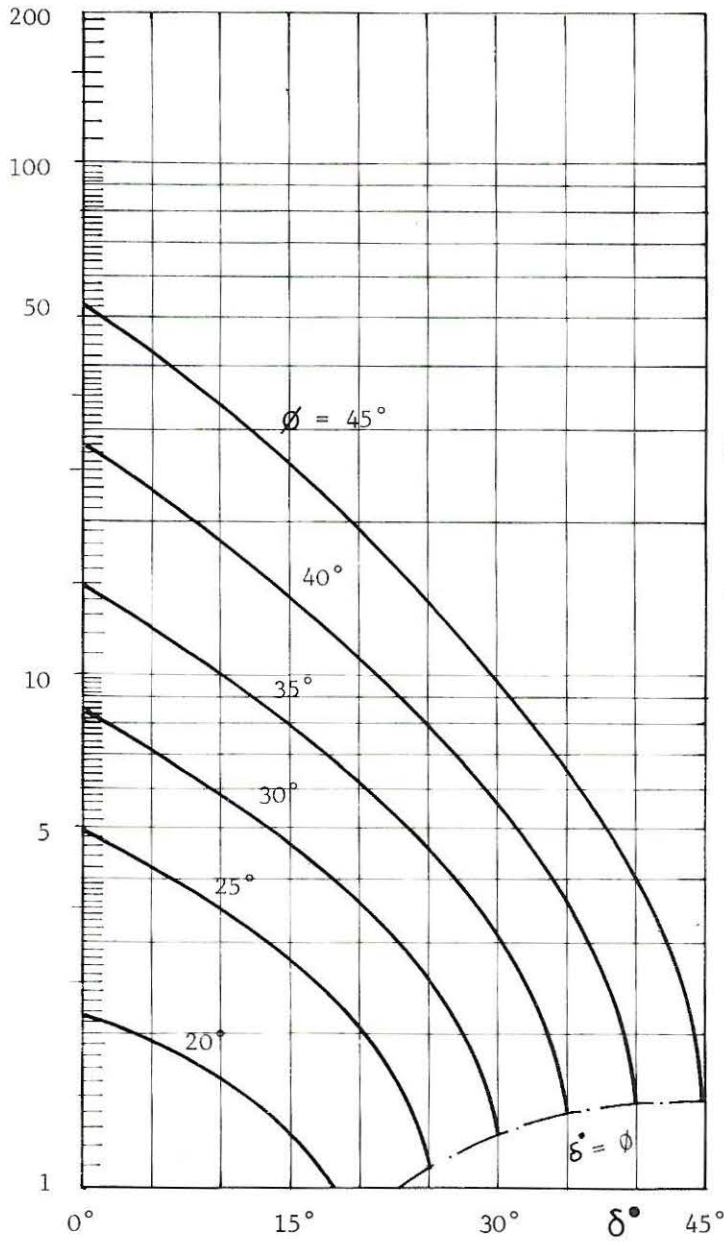
$$\beta = 10^0 \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$



8-3

N $q\beta\delta$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$



8-3

$N_{\alpha\beta\delta}$

$$\beta = 20^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0				2.22	4.87	8.46	14.83	27.01	52.42	111.56
0.1				2.11	4.53	7.70	13.12	23.11	43.04	87.00
0.2				1.99	4.19	6.94	11.48	19.51	34.78	66.60
0.3				1.87	3.84	6.19	9.92	16.23	27.63	49.96
0.4				1.74	3.49	5.47	8.46	13.29	21.53	36.66
0.5				1.61	3.14	4.77	7.11	10.68	16.42	26.21
0.6				1.48	2.80	4.09	5.86	8.39	12.19	18.16
0.7				1.34	2.45	3.44	4.71	6.40	8.74	12.09
0.8				1.19	2.09	2.81	3.66	4.69	5.97	7.60
0.9				1.02	1.71	2.18	2.67	3.18	3.73	4.32
1				0.73	1.10	1.26	1.37	1.43	1.45	1.41

$N_{\alpha\beta\delta}$

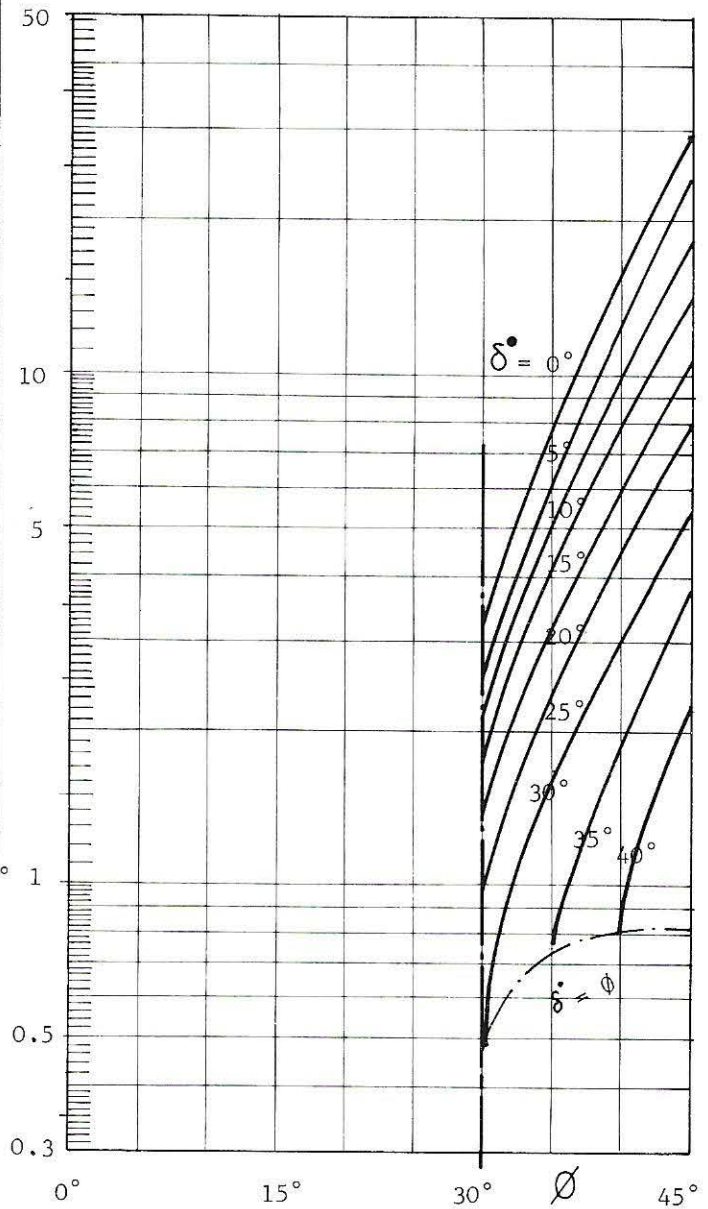
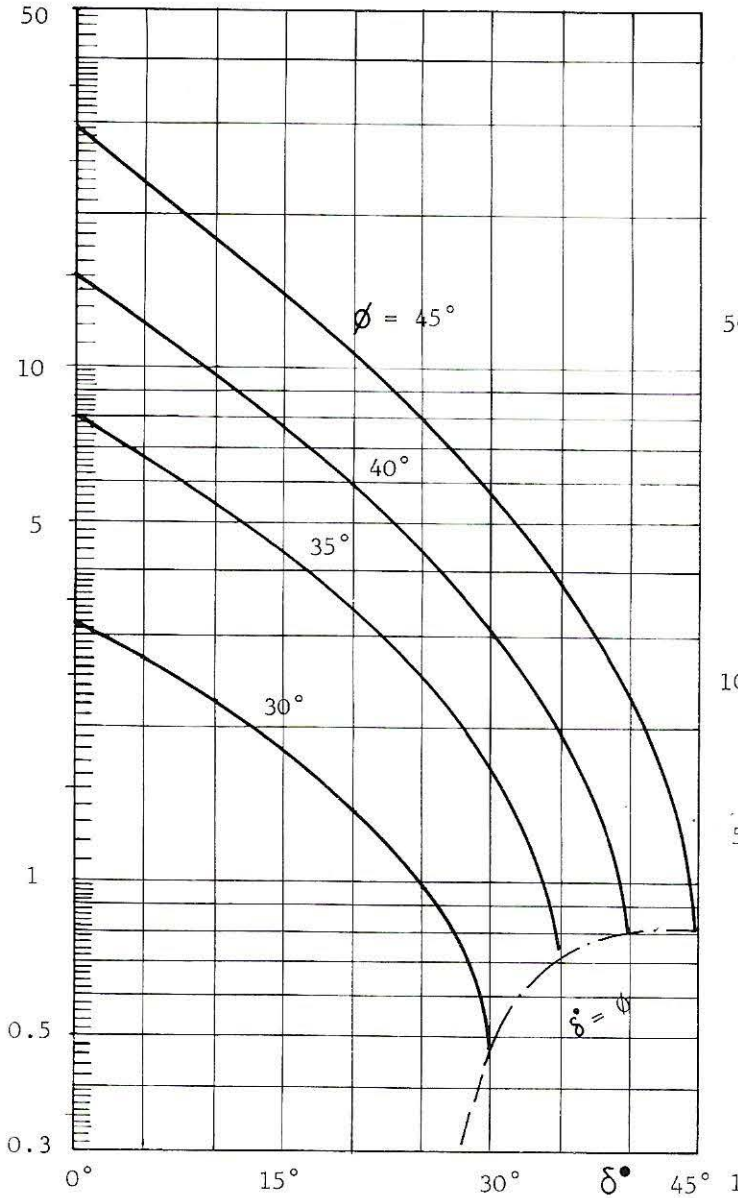
$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0						3.17	8.01	15.13	29.14	59.99
0.1						2.88	7.09	12.95	23.93	46.78
0.2						2.59	6.20	10.93	19.34	35.81
0.3						2.32	5.36	9.09	15.36	26.86
0.4						2.04	4.57	7.45	11.97	19.71
0.5						1.78	3.84	5.98	9.13	14.09
0.6						1.53	3.16	4.70	6.77	9.76
0.7						1.29	2.54	3.59	4.86	6.50
0.8						1.05	1.97	2.62	3.32	4.08
0.9						0.82	1.44	1.78	2.07	2.32
1						0.48	0.74	0.81	0.81	0.77

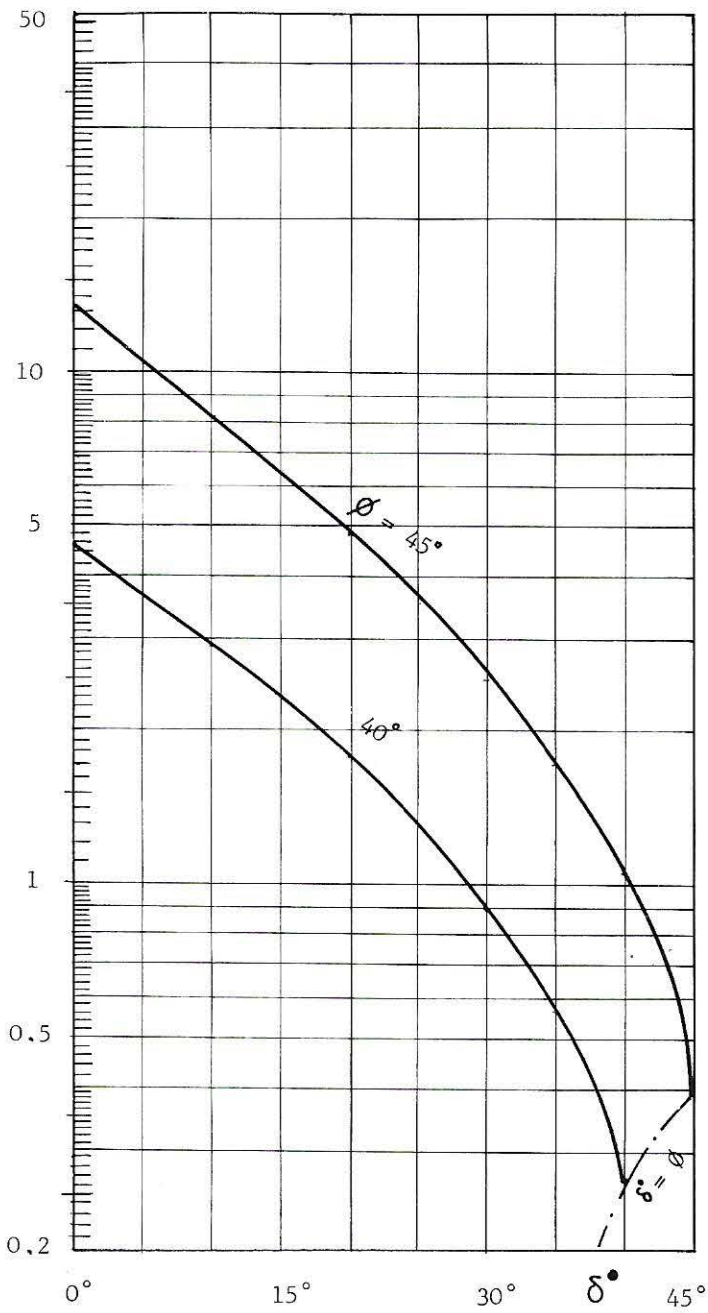
N

$q\beta\delta$

$$\beta = 30^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

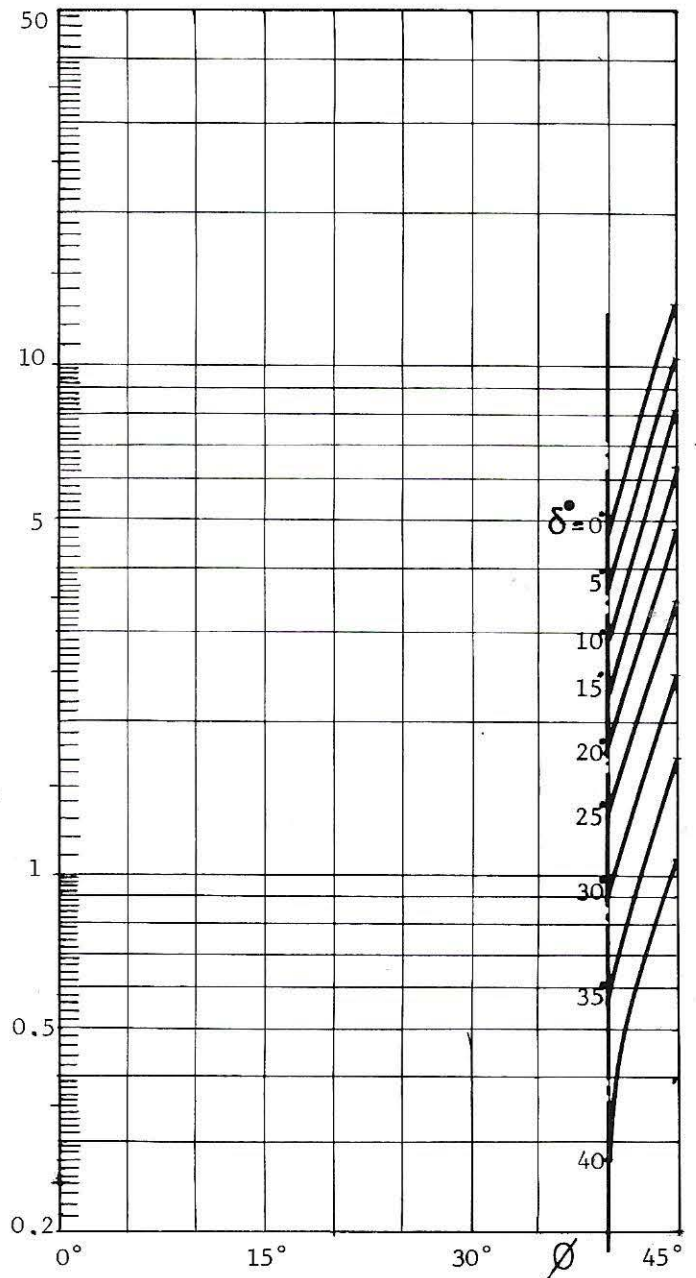


8-3



$$Nq\beta\delta$$

$$\beta = 40^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$



8-3

$N_{q\beta\delta}$

$\beta = 40^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 1$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0								4.46	13.32	28.38
0.1								3.81	10.93	22.13
0.2								3.22	8.83	16.94
0.3								2.68	7.02	12.71
0.4								2.19	5.47	9.32
0.5								1.76	4.17	6.66
0.6								1.38	3.09	4.62
0.7								1.06	2.22	3.07
0.8								0.78	1.52	1.93
0.9								0.54	0.96	1.11
1								0.27	0.40	0.39

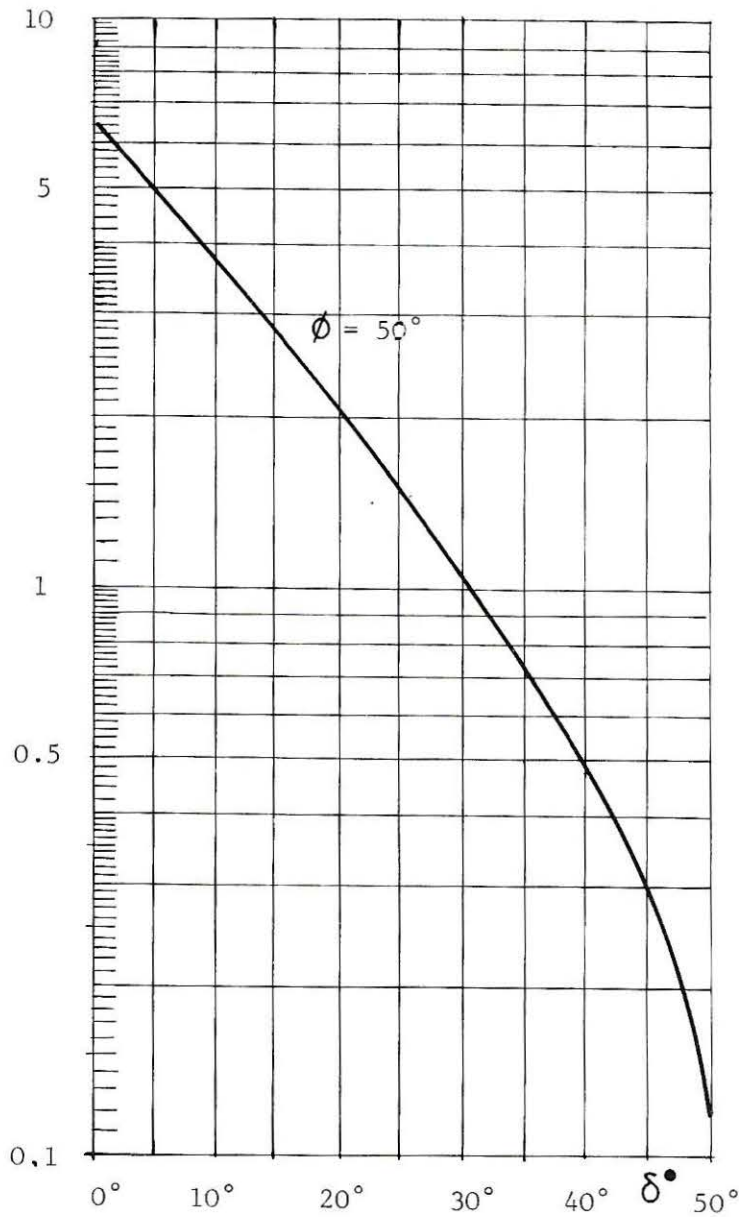
$N_{\alpha\beta\delta}$

$\beta = 50^\circ$ $\frac{\delta_0}{\beta} = 1$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0										6.31
0.1										4.92
0.2										3.76
0.3										2.82
0.4										2.07
0.5										1.48
0.6										1.04
0.7										0.71
0.8										0.47
0.9										0.29
1										0.12

$N_{q\beta\delta}$

$$\beta = 50^\circ \quad \frac{\delta_0}{\beta} = 1$$

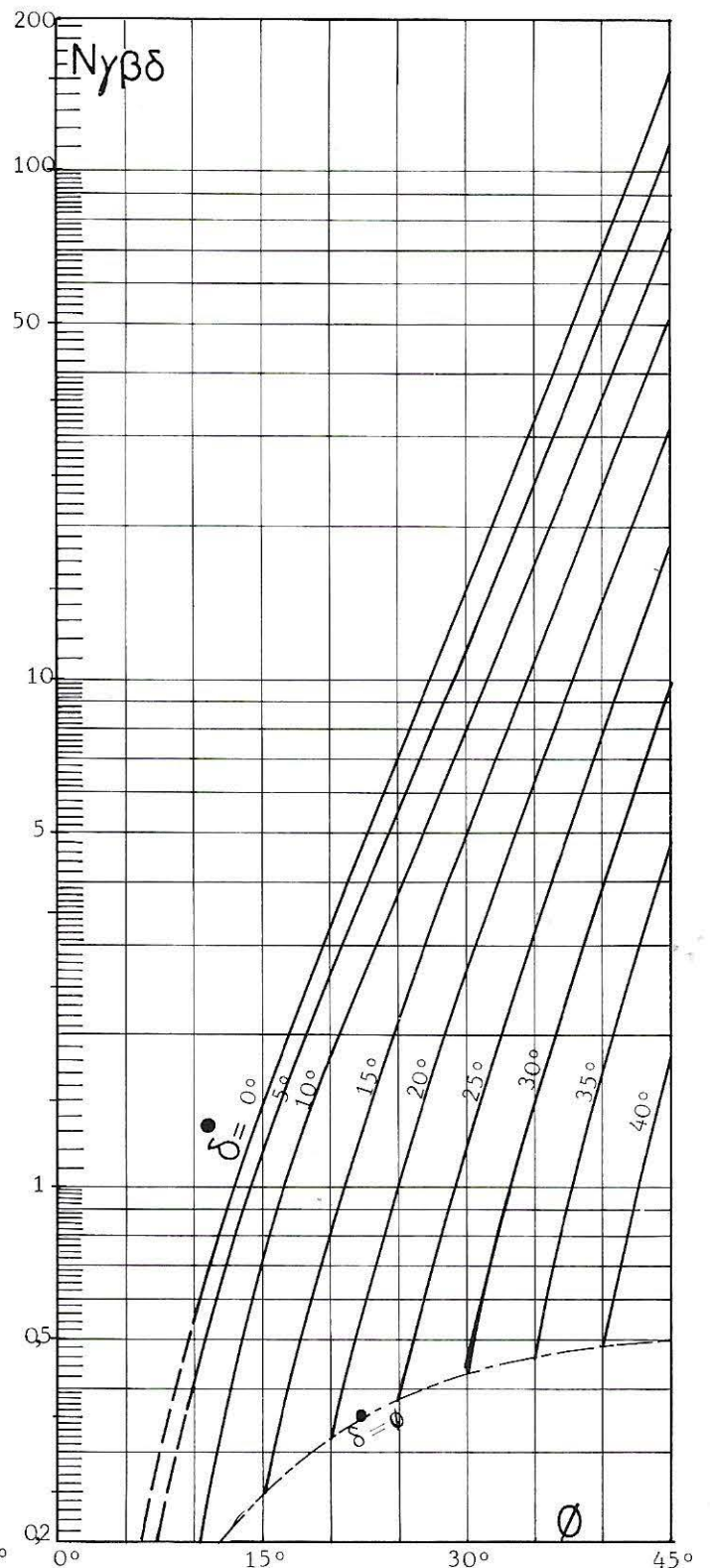
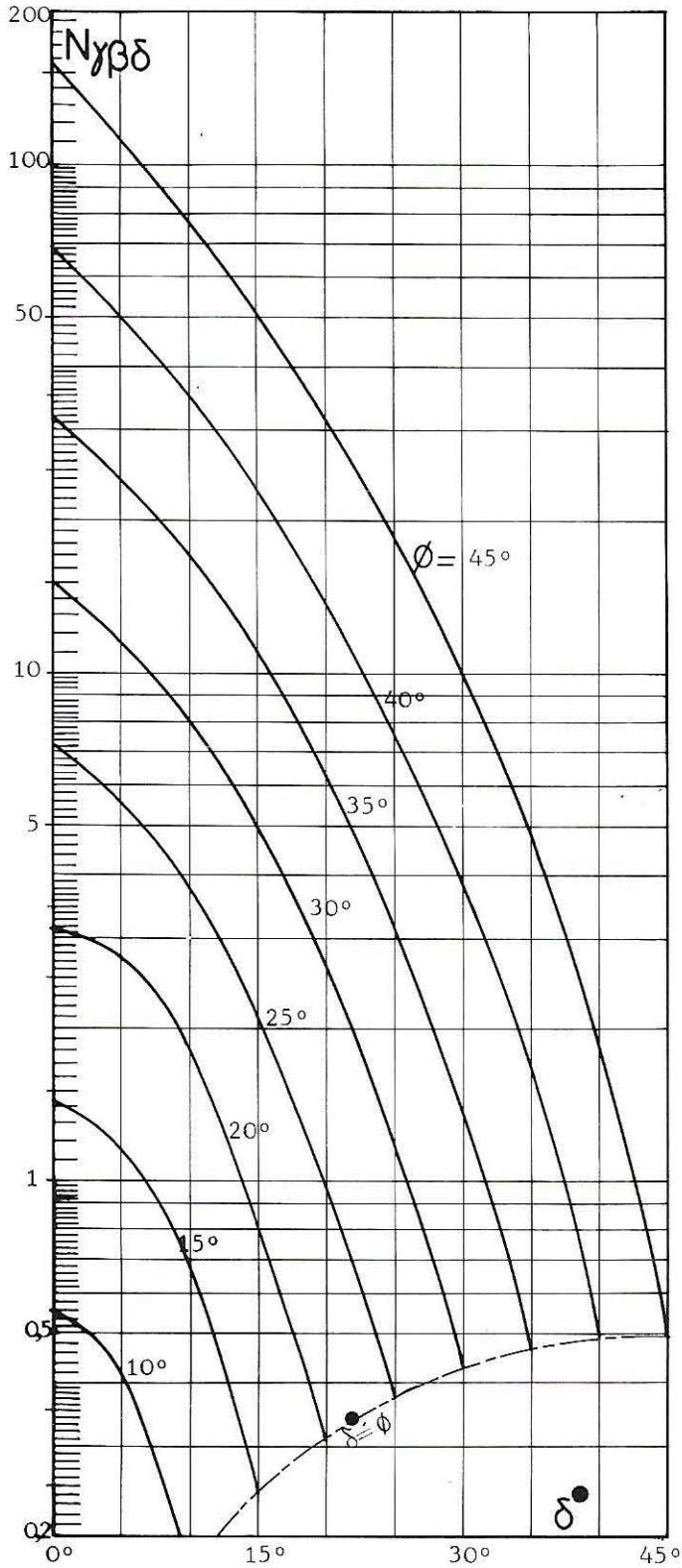


8-3

$$N_{\gamma\beta\delta}$$

$$\frac{\beta}{\phi} = 0.20$$

8-3



N $\gamma\beta\delta$

$$\frac{\beta}{\phi} = 0.20$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.55	1.43	3.15	7.2	15.1	32.0	68.7	158	0°
0.42	1.18	2.80	5.60	11.6	24.2	50.4	113	5°
0.17	0.70	1.80	3.80	8.06	17.0	35.1	77.4	10°
	0.25	0.80	2.10	5.06	11.1	22.9	50.6	15°
		0.31	0.97	2.66	6.20	13.9	31.8	20°
			0.38	1.20	3.15	7.60	18.5	25°
				0.43	1.40	3.90	9.90	30°
					0.47	1.70	4.80	35°
						0.49	1.85	40°
							0.50	45°

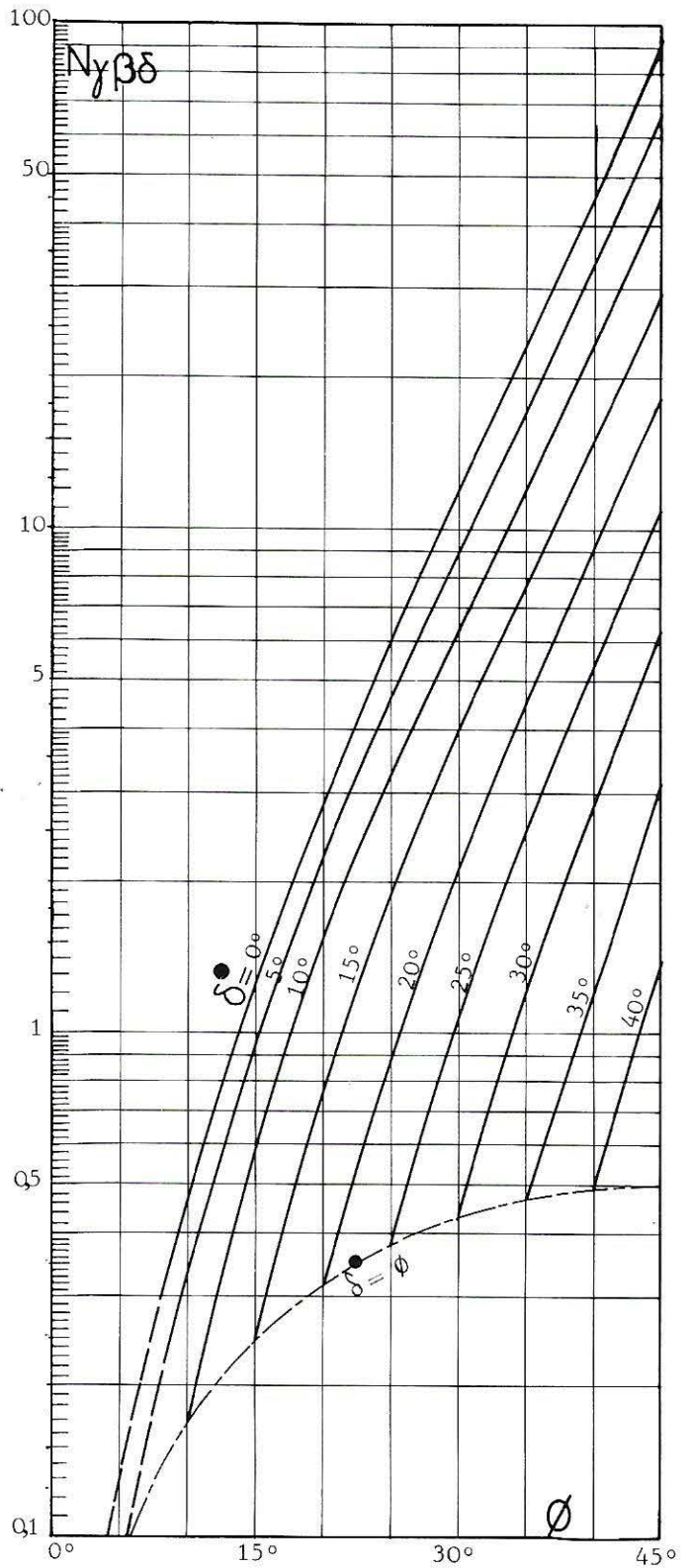
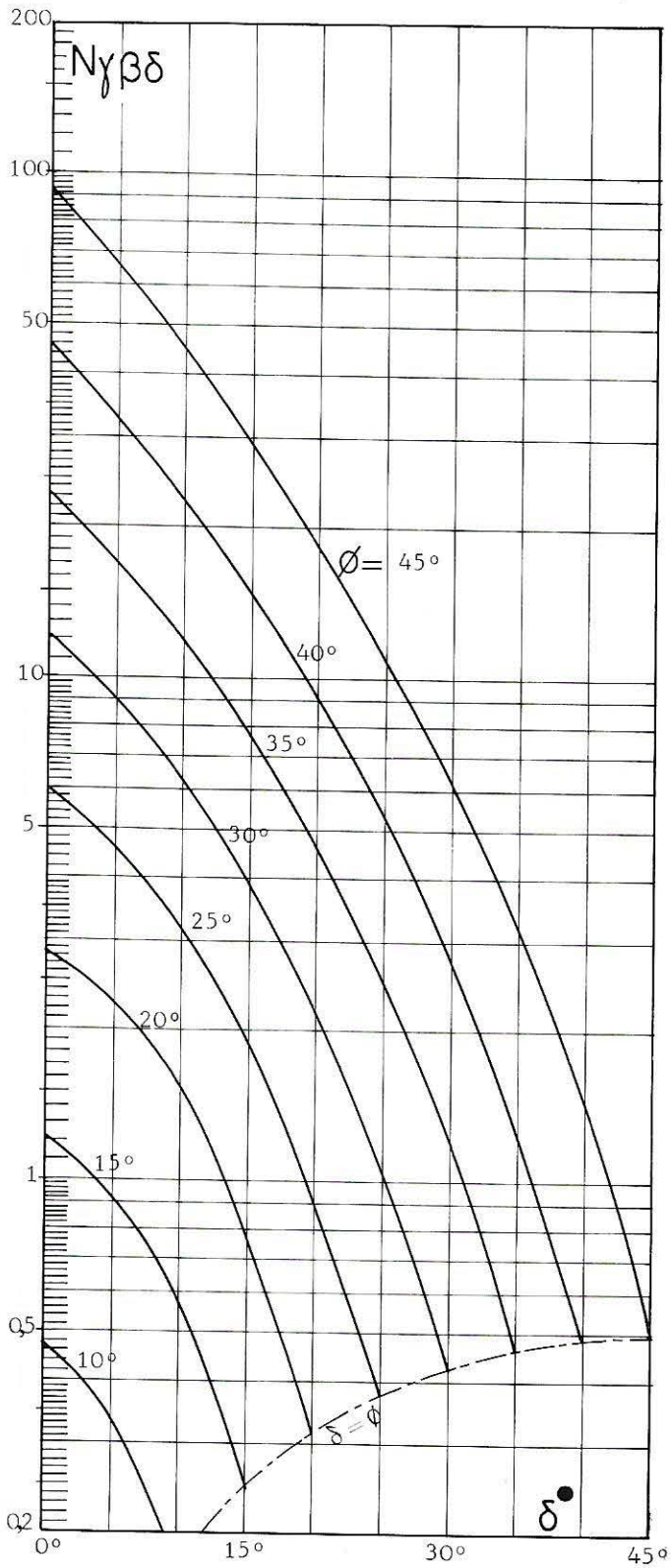
N $\gamma\beta\delta$

$\beta/\Phi = 0.40$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.47	1.22	2.83	6.00	12.0	23.0	45.2	92.2	0°
0.33	0.93	2.48	4.60	9.00	17.0	32.9	66.2	5°
0.17	0.57	1.55	3.22	6.18	12.0	22.6	45.0	10°
	0.25	0.76	1.90	3.92	7.70	14.71	29.2	15°
		0.31	0.88	2.16	4.55	9.2	18.0	20°
			0.38	1.10	2.50	5.30	11.0	25°
				0.43	1.20	2.80	6.20	30°
					0.47	1.20	3.12	35°
						0.49	1.38	40°
							0.50	45°

8-3

$$N_{\gamma\beta\delta}$$
$$\frac{\beta}{\phi} = 0.40$$

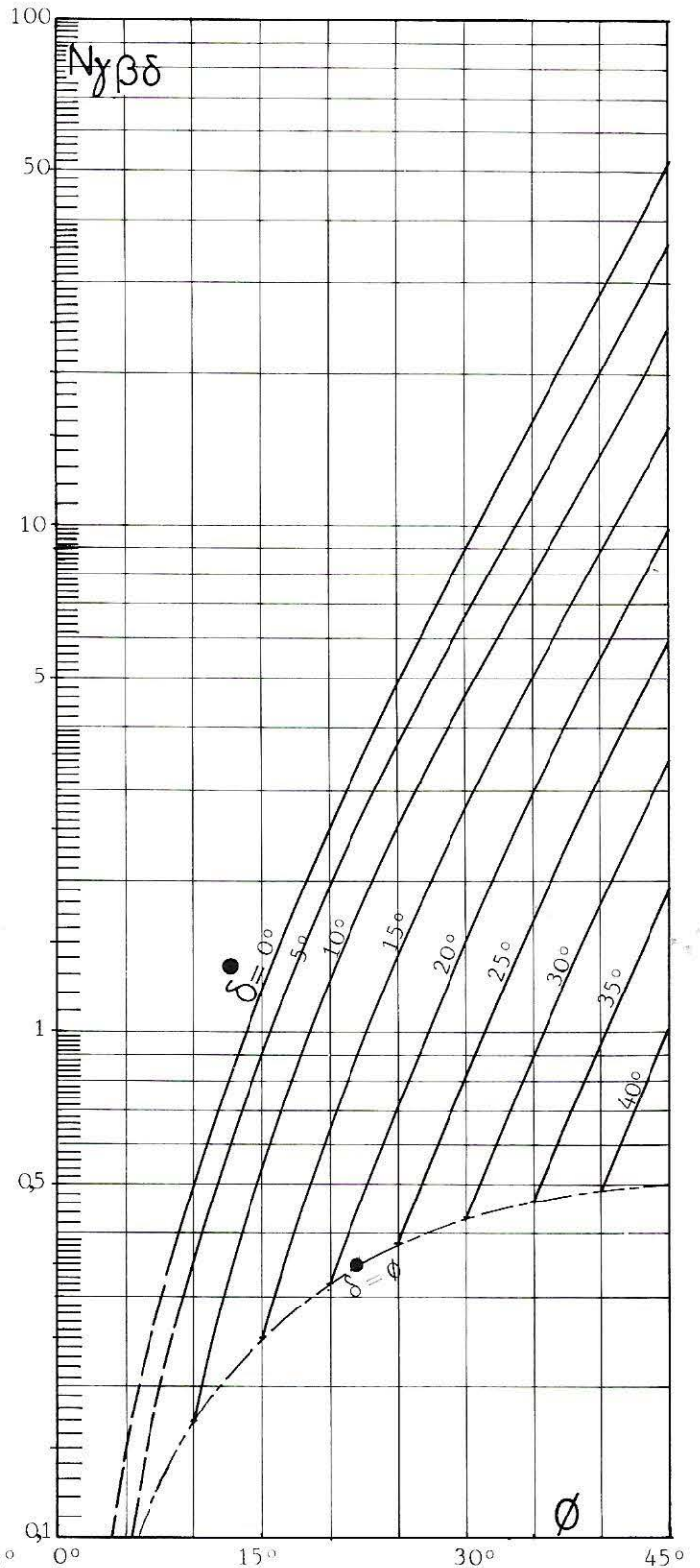
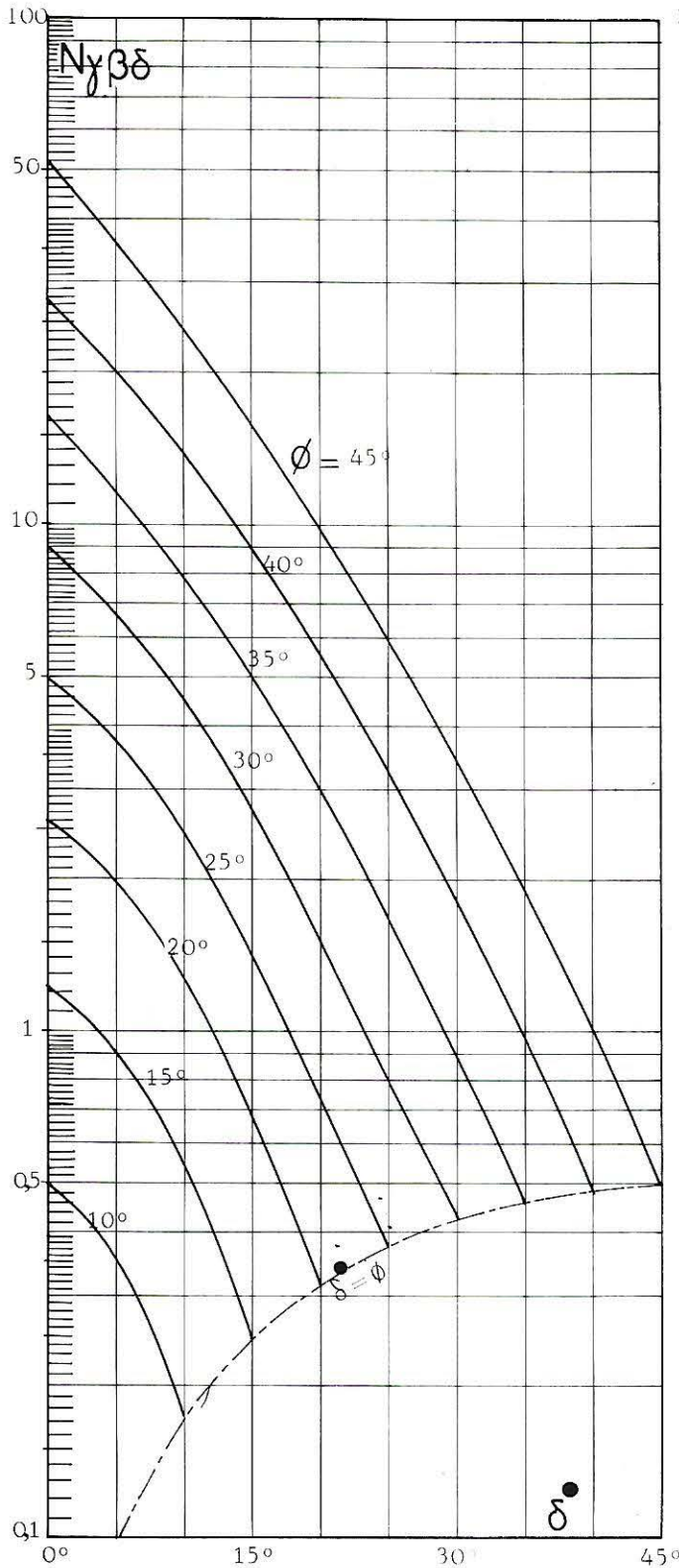


8-3

$$N_{\gamma\beta\delta}$$

$$\frac{\beta}{\phi} = 0.60$$

8-3



N $\gamma\beta\delta$

$\beta/\phi = 0.60$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.50	1.22	2.55	4.90	8.94	16.3	27.8	51.6	0°
0.35	0.91	2.10	3.75	6.68	11.5	20.0	35.7	5°
0.170	0.54	1.30	2.45	4.54	7.80	13.6	24.2	10°
	0.25	0.62	1.45	2.80	5.10	8.90	15.4	15°
		0.31	0.72	1.48	3.00	5.50	9.60	20°
			0.38	0.79	1.65	3.20	5.90	25°
				0.43	0.88	1.80	3.45	30°
					0.47	0.96	1.95	35°
						0.49	1.01	40°
							0.50	45°

N $\gamma\beta\delta$

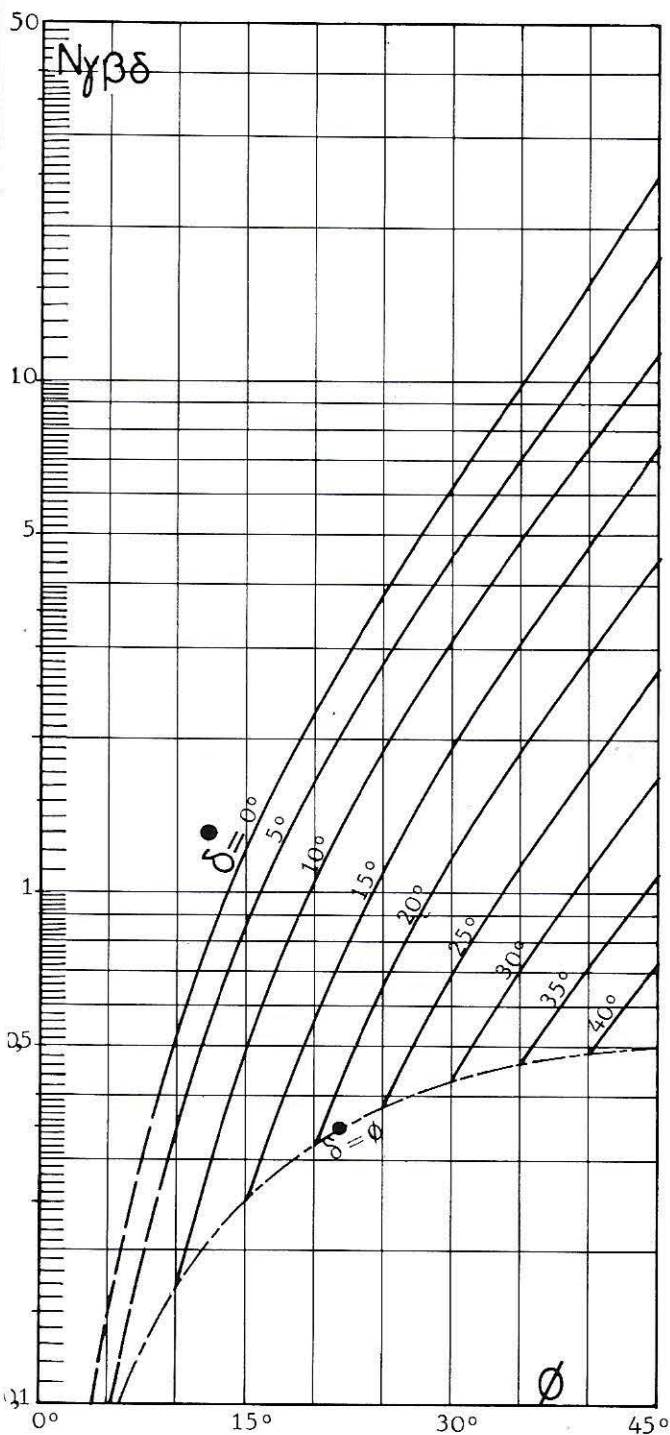
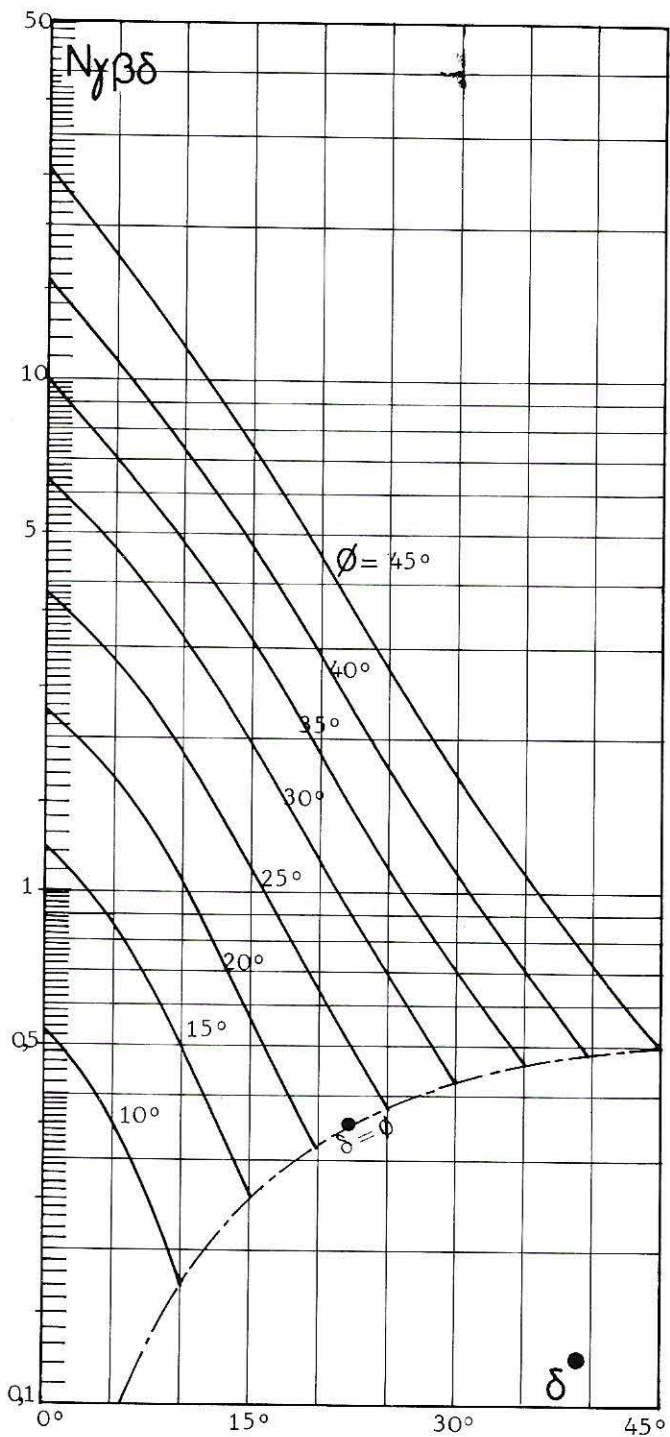
$$\beta/\phi = 0.80$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	ϕ δ°
0.53	1.22	2.24	3.80	6.30	9.80	15.4	25.7	0°
0.36	0.86	1.65	2.82	4.60	7.10	11.0	17.3	5°
0.17	0.49	1.07	1.90	3.10	4.90	7.50	11.6	10°
	0.25	0.56	1.10	1.94	3.10	4.80	7.44	15°
		0.31	6.60	1.18	1.85	2.90	4.48	20°
			0.38	0.71	1.12	1.76	2.70	25°
				0.43	0.70	1.12	1.70	30°
					0.47	0.72	1.10	35°
						0.49	0.73	40°
							0.50	45°

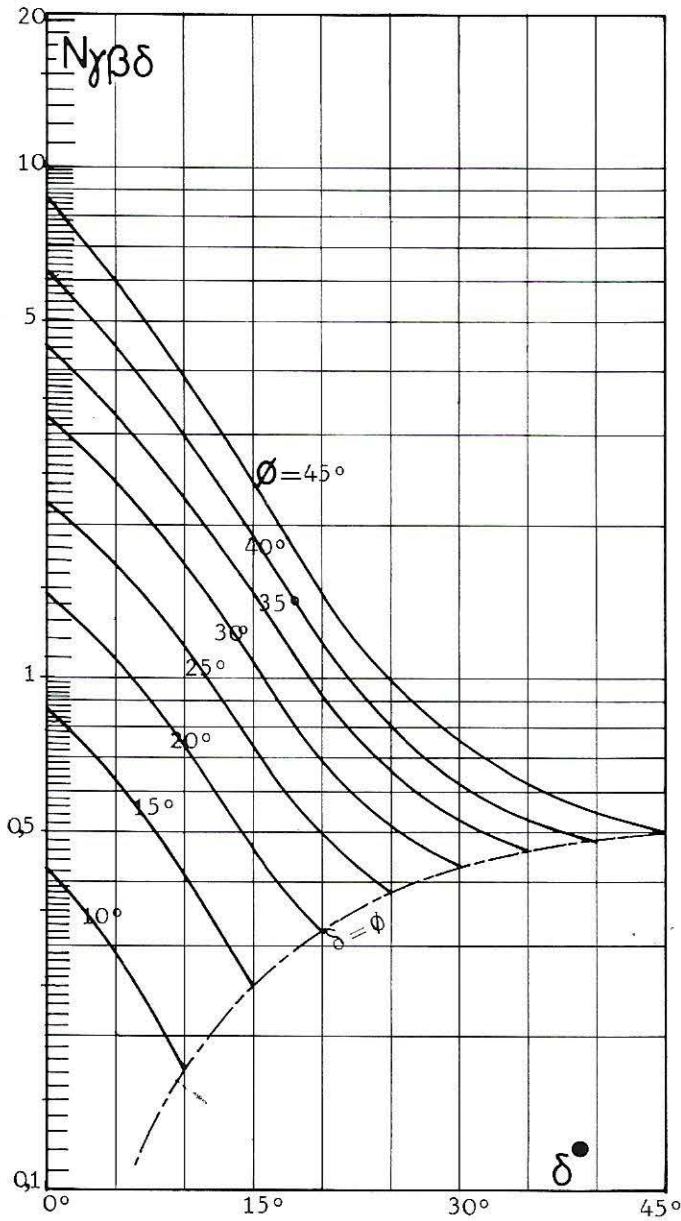
8-3

N_{γβδ}

$$\frac{\beta}{\phi} = 0.80$$

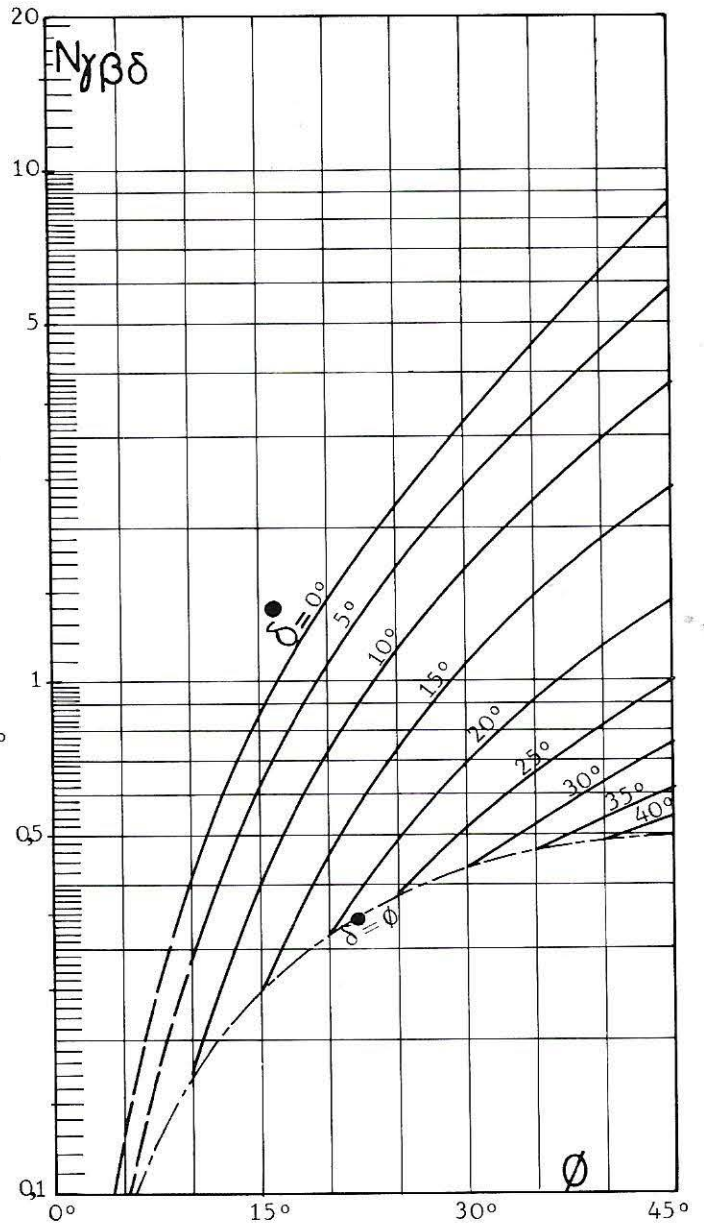


8-3



$$N_{\gamma\beta\delta}$$

$$\frac{\beta}{\phi} = 1.00$$



8-3

N $\gamma\beta\delta$

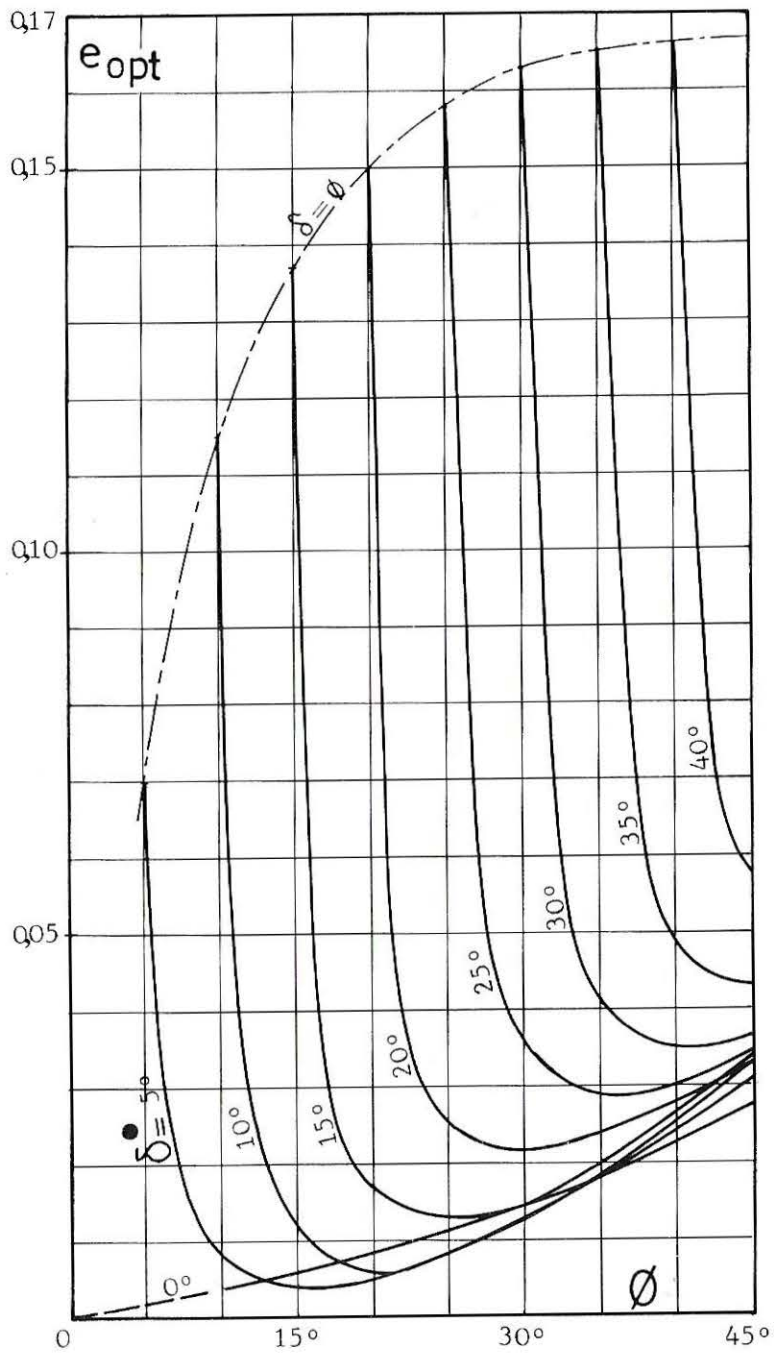
$\beta/\Phi = 1.0$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.42	0.86	1.46	2.20	3.22	4.50	6.30	8.64	0°
0.29	0.62	1.10	1.70	2.40	3.30	4.44	5.92	5°
0.17	0.41	0.75	1.16	1.68	2.28	3.00	3.88	10°
	0.25	0.46	0.72	1.09	1.47	1.92	2.40	15°
		0.31	0.49	0.70	0.92	1.20	1.46	20°
			0.38	0.52	0.66	0.81	1.00	25°
				0.43	0.53	0.62	0.76	30°
					0.47	0.53	0.62	35°
						0.49	0.54	40°
							0.50	45°

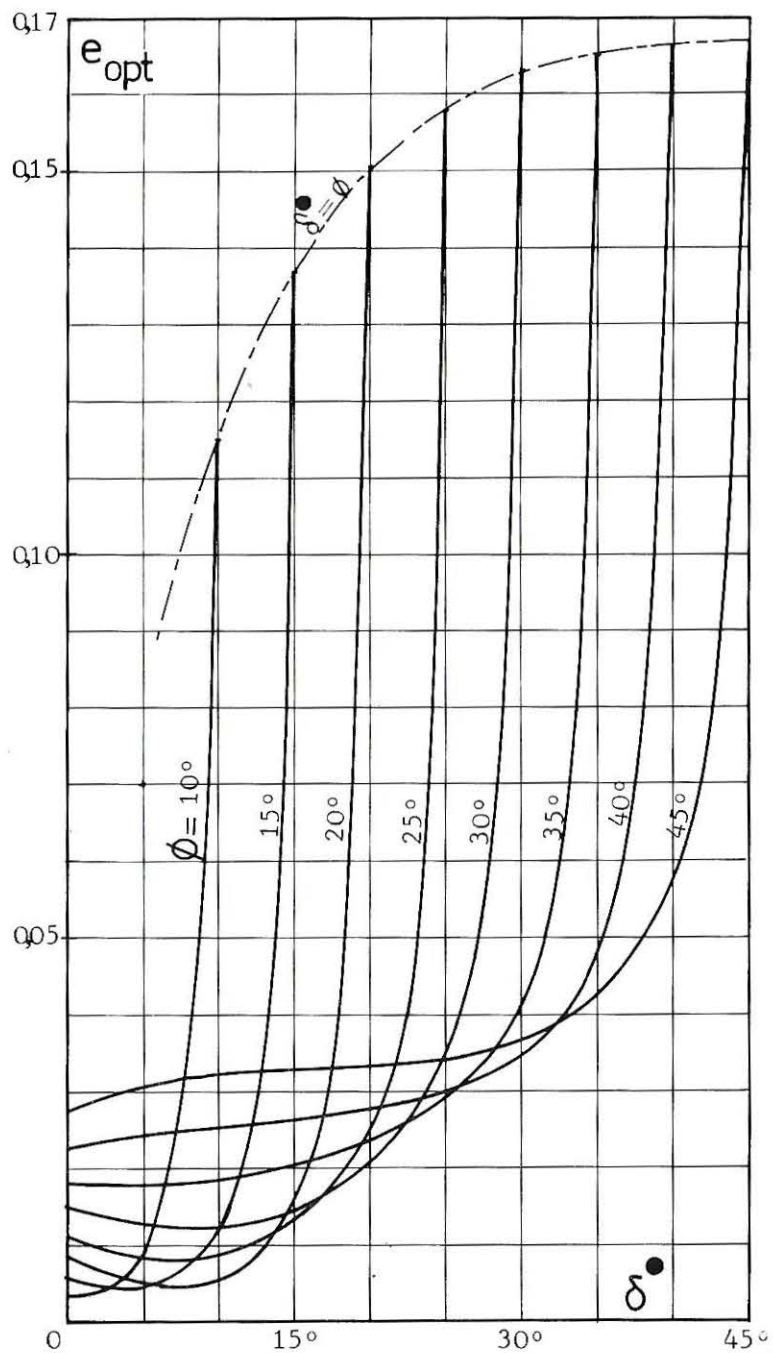
e_{opt}

$$\frac{\beta}{\Phi} = 0.20$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.003	0.006	0.008	0.011	0.015	0.018	0.023	0.027	0°
0.009	0.004	0.005	0.009	0.013	0.018	0.024	0.030	5°
0.115	0.012	0.005	0.009	0.012	0.018	0.025	0.032	10°
	0.137	0.016	0.013	0.014	0.020	0.026	0.033	15°
		0.150	0.025	0.021	0.024	0.027	0.033	20°
			0.158	0.034	0.029	0.030	0.034	25°
				0.163	0.041	0.034	0.037	30°
					0.165	0.048	0.043	35°
						0.167	0.058	40°
							0.167	45°

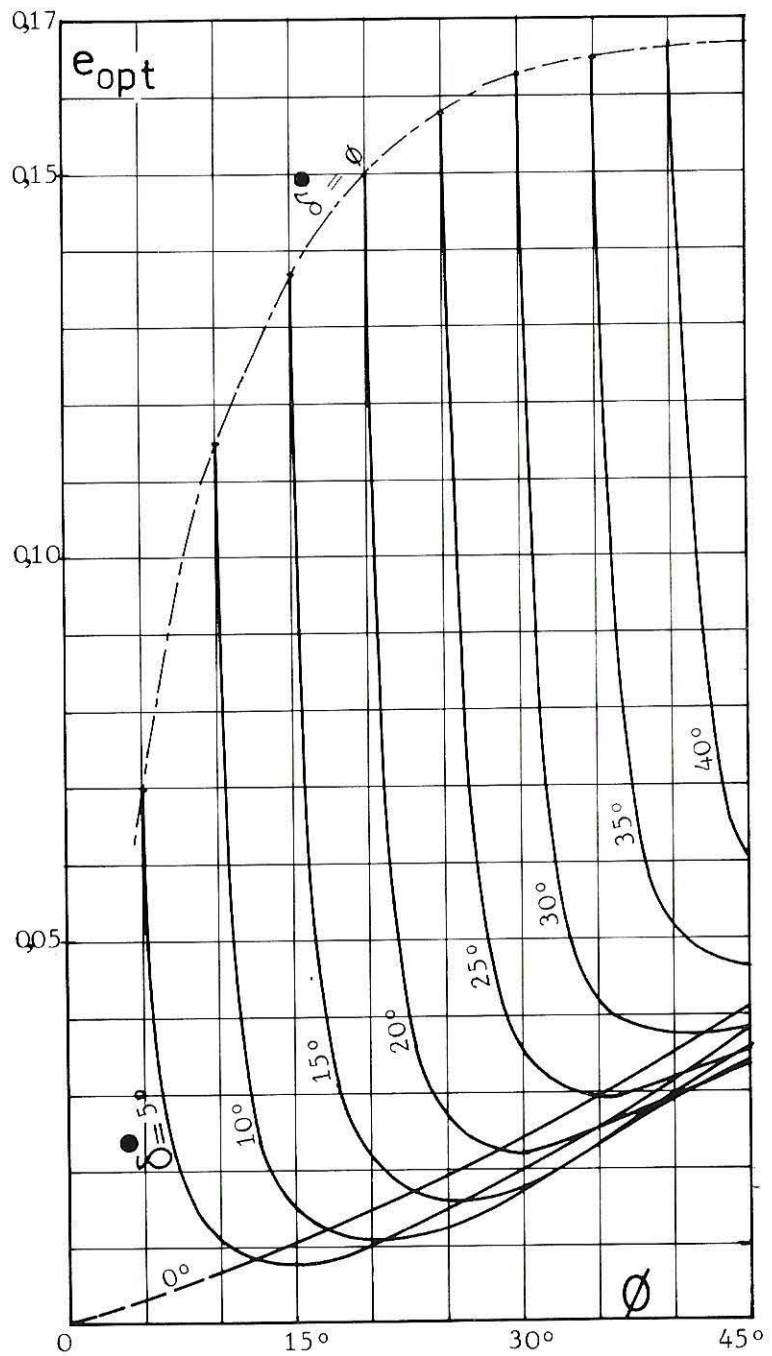
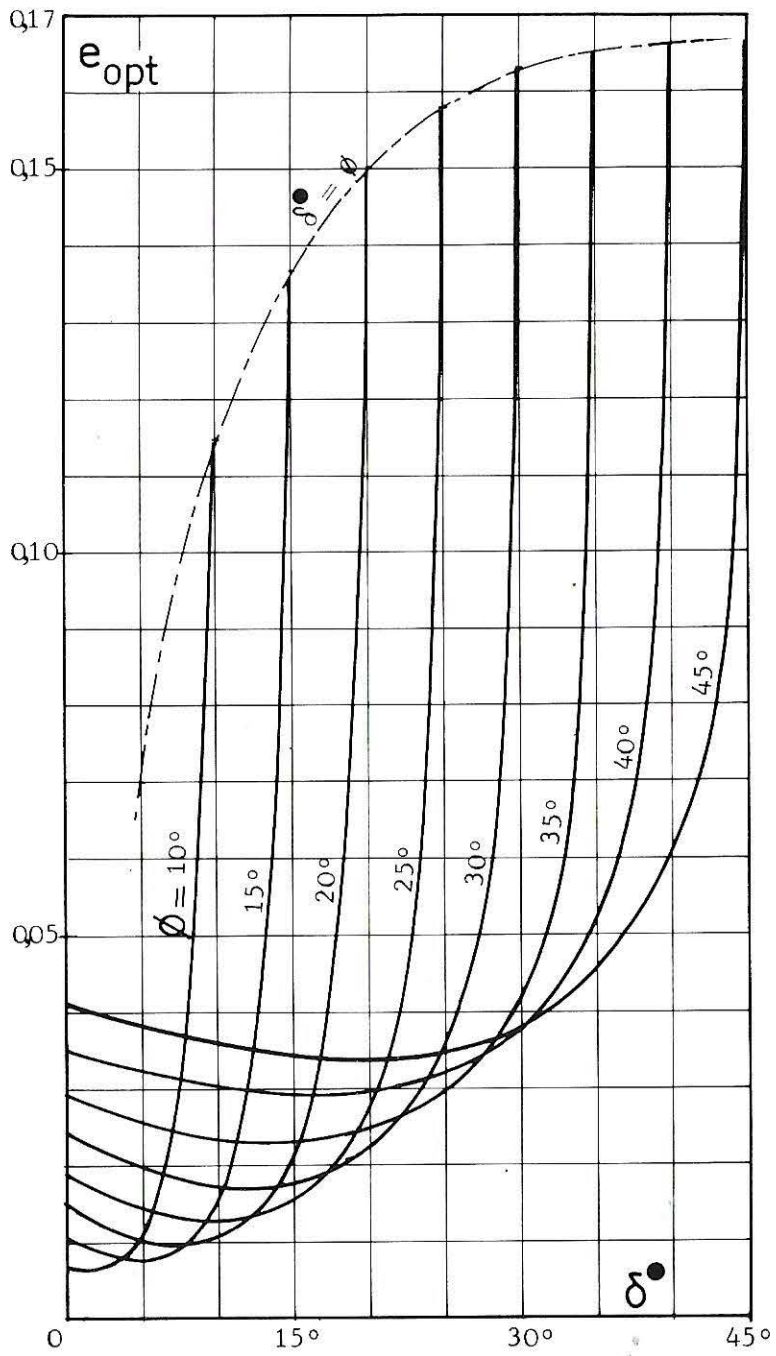


8-8



e_{opt}

$\beta/\phi = 0.20$



e_{opt}
 $\beta/\phi = 0.40$

e_{opt}

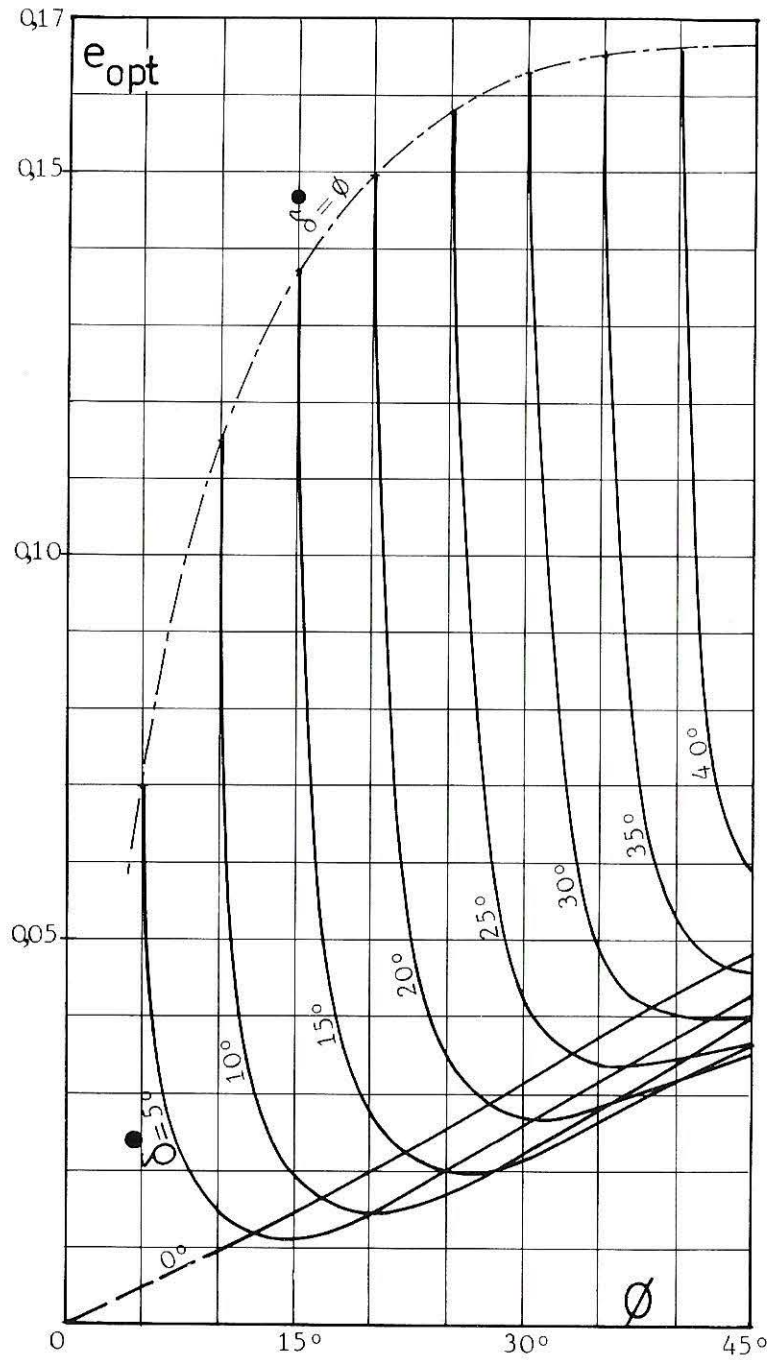
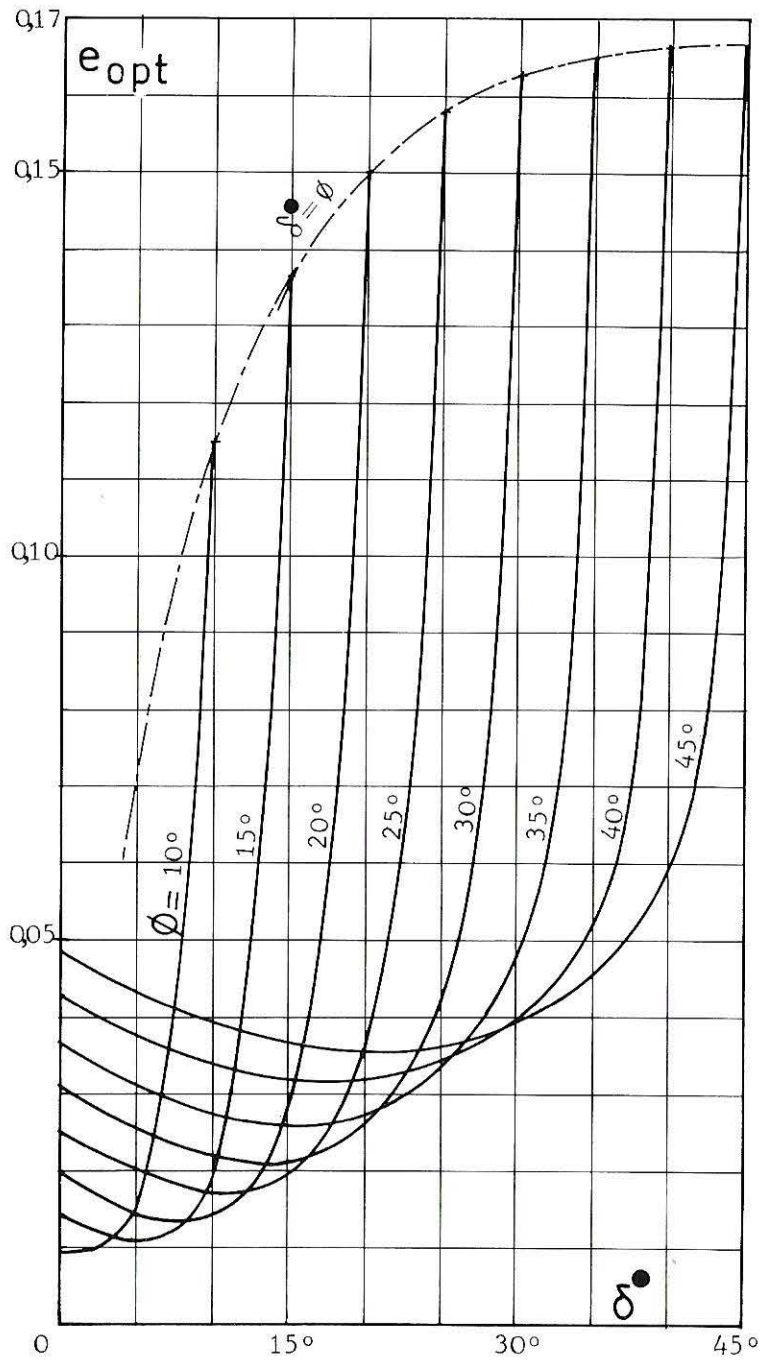
$\beta/\phi = 0.40$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	ϕ δ°
0.007	0.011	0.015	0.019	0.024	0.029	0.035	0.041	0°
0.01	0.008	0.010	0.014	0.020	0.026	0.032	0.038	5°
0.115	0.015	0.011	0.013	0.017	0.023	0.030	0.036	10°
	0.137	0.022	0.016	0.018	0.023	0.029	0.034	15°
		0.150	0.027	0.022	0.025	0.030	0.034	20°
			0.158	0.035	0.030	0.032	0.035	25°
				0.163	0.041	0.038	0.038	30°
					0.165	0.052	0.046	35°
						0.167	0.061	40°
							0.167	45°

θ_{opt}

$$\beta/\Phi = 0.60$$

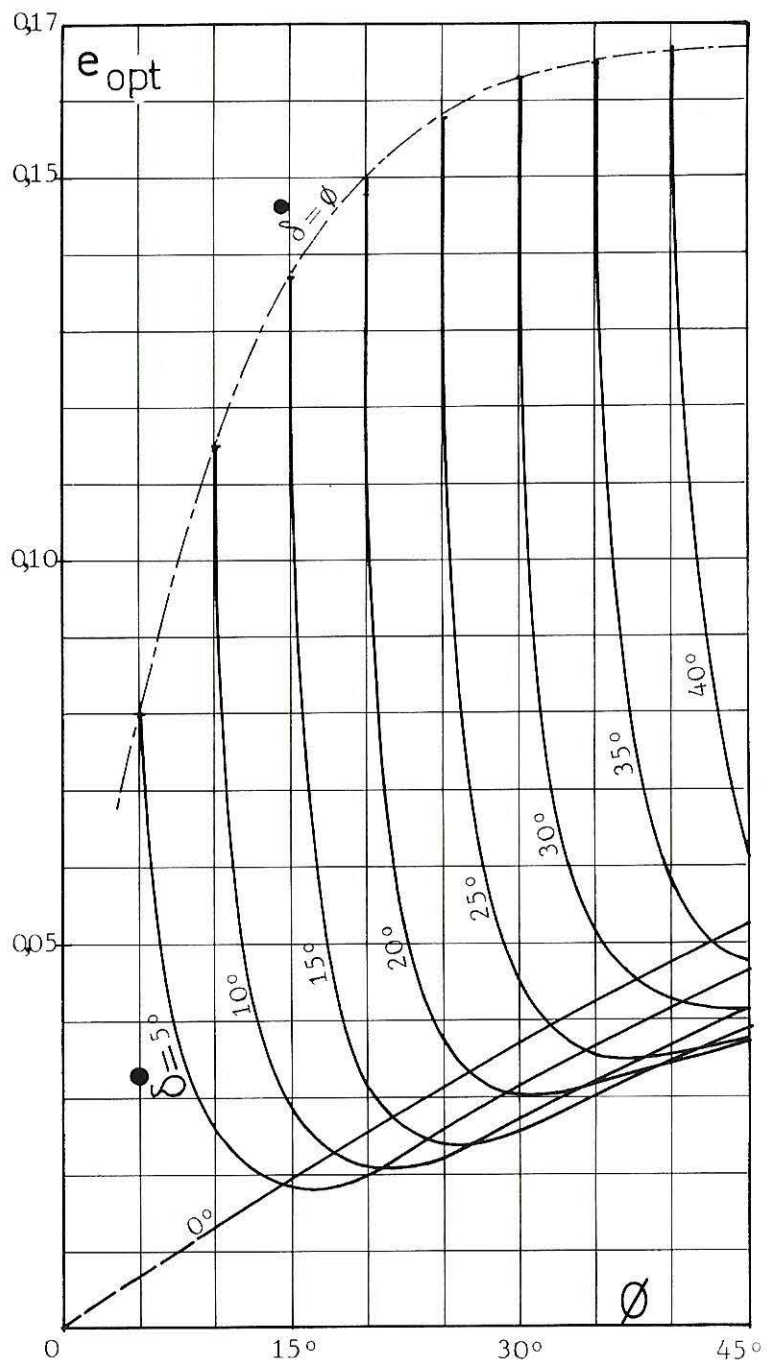
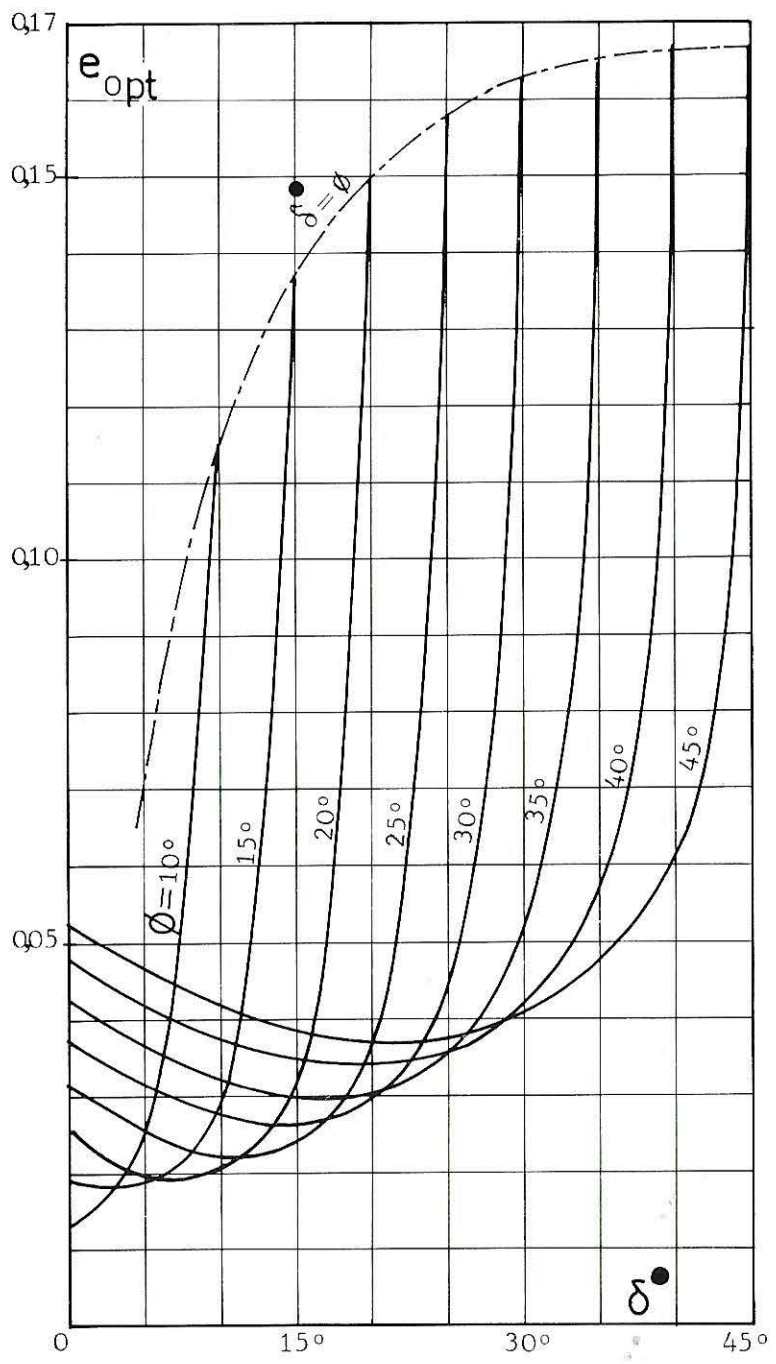
10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.009	0.014	0.020	0.025	0.031	0.037	0.043	0.048	0°
0.014	0.011	0.014	0.020	0.026	0.031	0.038	0.043	5°
0.155	0.019	0.014	0.017	0.022	0.028	0.034	0.039	10°
	0.137	0.027	0.020	0.021	0.026	0.032	0.037	15°
		0.158	0.035	0.027	0.027	0.032	0.035	20°
			0.163	0.044	0.033	0.034	0.036	25°
				0.165	0.048	0.039	0.039	30°
					0.165	0.052	0.045	35°
						0.167	0.059	40°
							0.167	45°



e_{opt}

$$\frac{\beta}{\phi} = 0.60$$

8-3



e_{opt}
 $\beta/\phi = 0.80$

e_{opt}

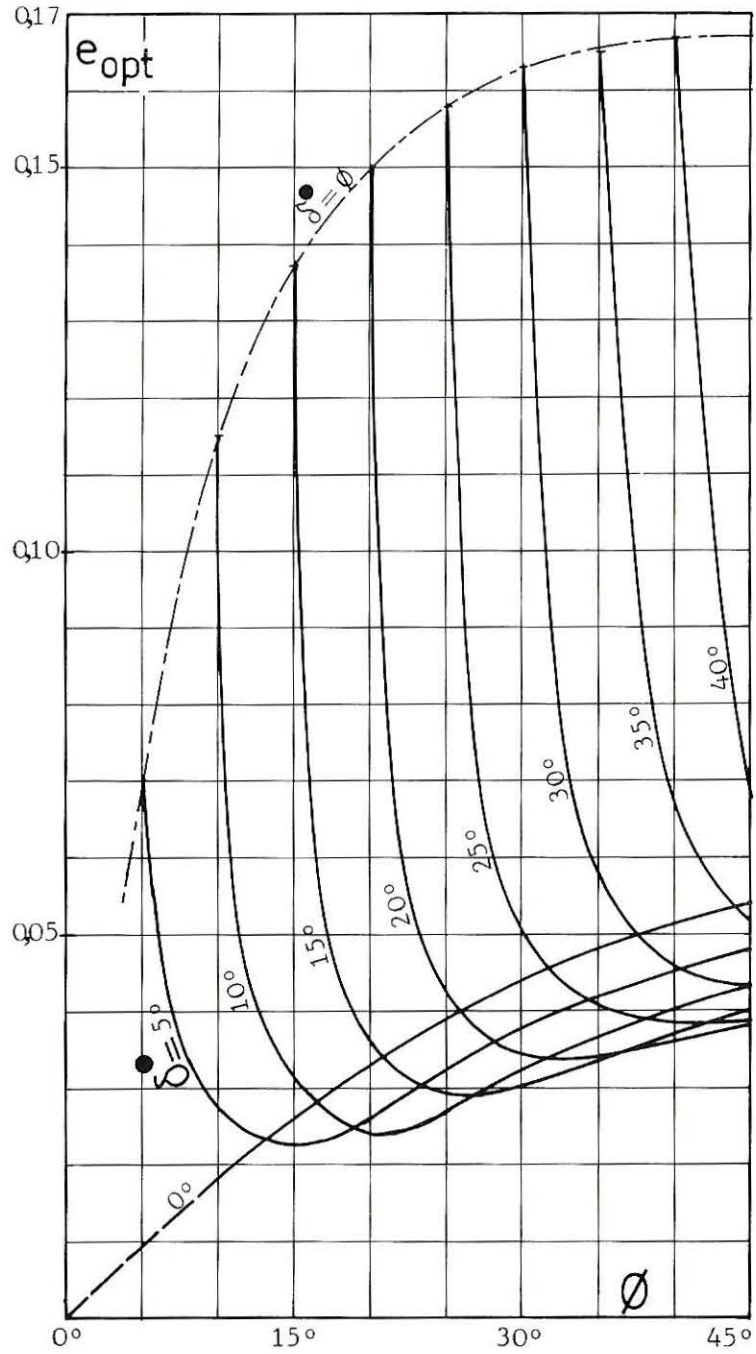
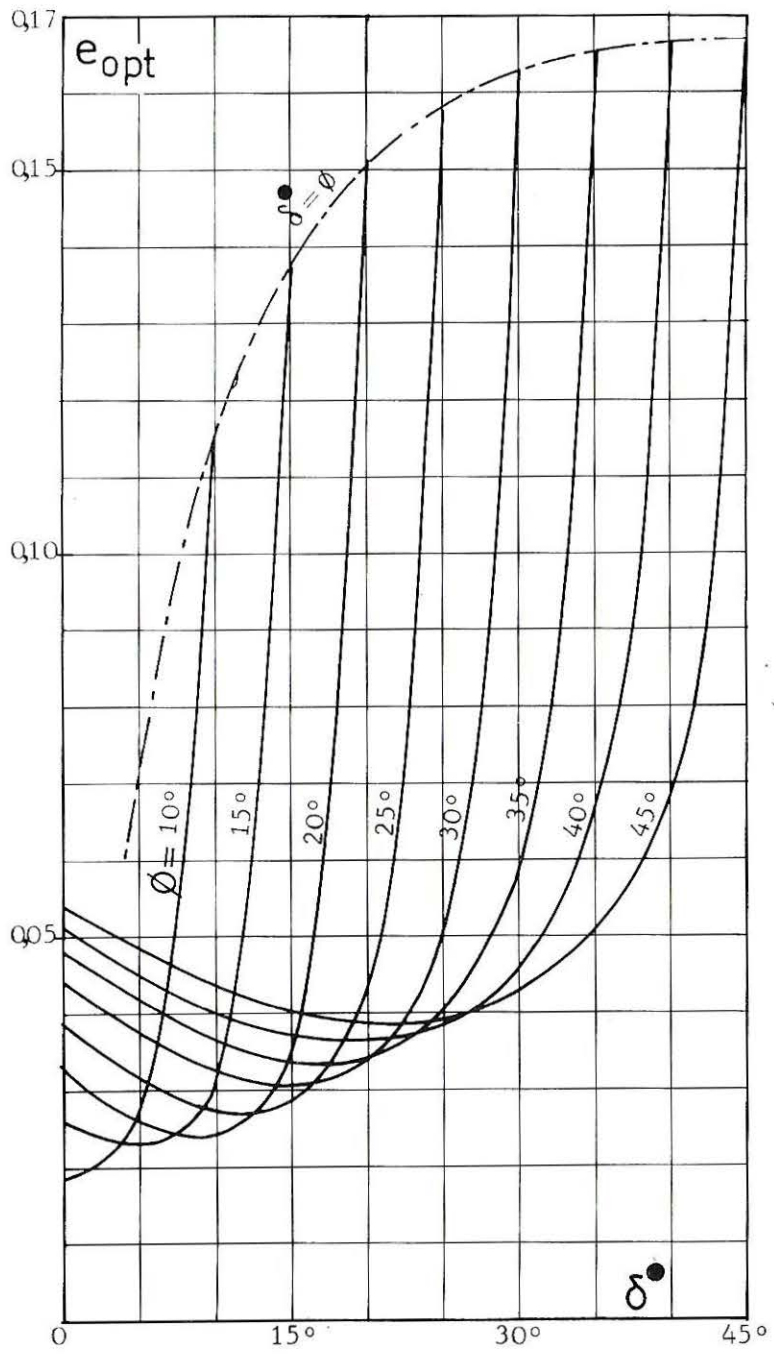
$\beta/\phi = 0.80$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	ϕ δ°
0.010	0.014	0.020	0.025	0.031	0.037	0.043	0.048	0°
0.015	0.011	0.015	0.020	0.026	0.031	0.038	0.043	5°
0.115	0.019	0.014	0.017	0.022	0.028	0.034	0.039	10°
	0.137	0.027	0.020	0.021	0.026	0.032	0.037	15°
		0.150	0.036	0.027	0.027	0.032	0.035	20°
			0.150	0.044	0.034	0.034	0.036	25°
				0.163	0.048	0.040	0.040	30°
					0.165	0.052	0.045	35°
						0.167	0.059	40°
							0.167	45°

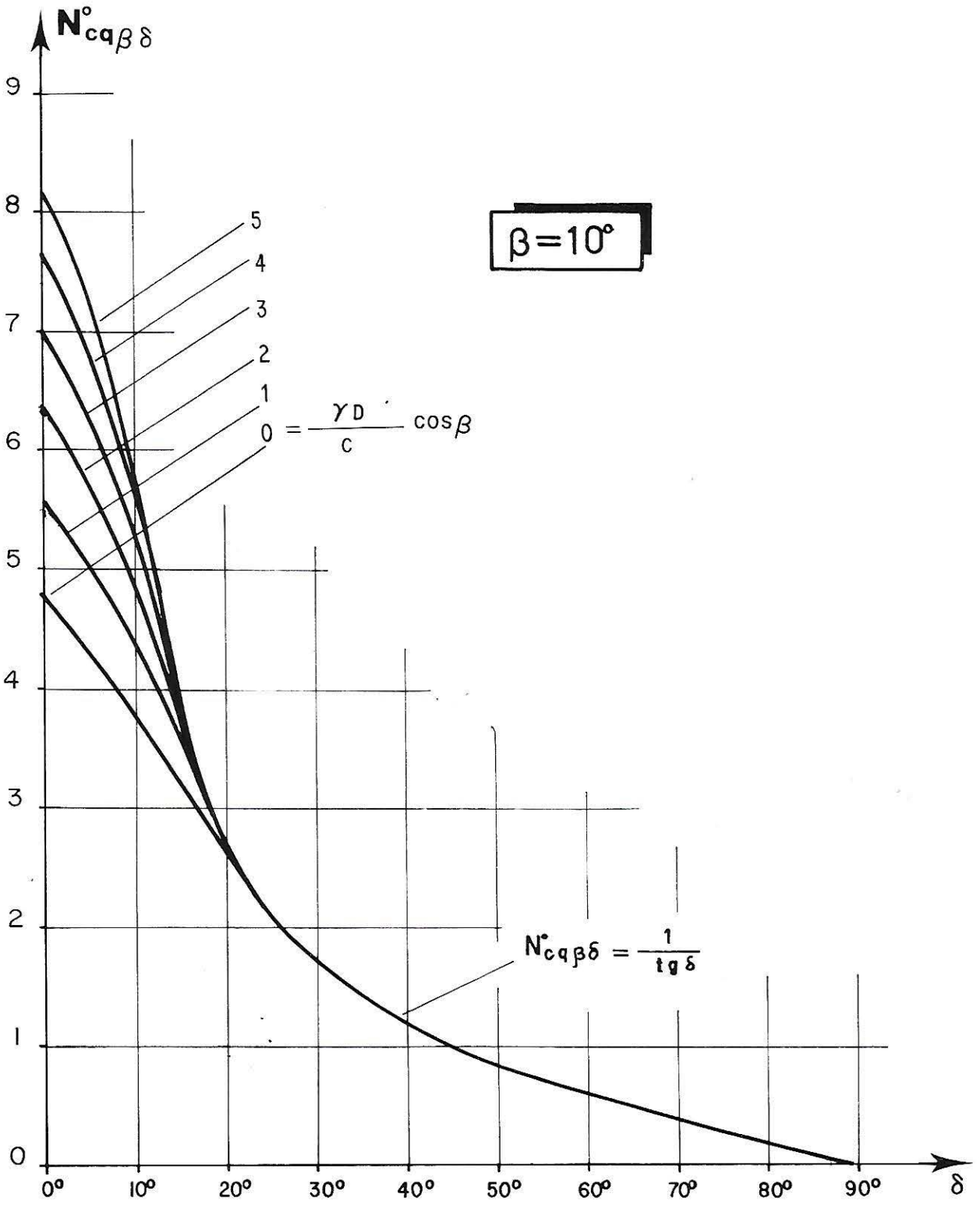
e_{opt}

$$\beta/\phi = 1.0$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.013	0.019	0.026	0.031	0.037	0.042	0.048	0.052	0°
0.016	0.019	0.020	0.026	0.032	0.037	0.041	0.047	5°
0.115	0.030	0.021	0.022	0.027	0.032	0.037	0.042	10°
	0.137	0.032	0.024	0.025	0.030	0.035	0.039	15°
		0.150	0.037	0.030	0.030	0.034	0.037	20°
			0.158	0.045	0.036	0.036	0.038	25°
				0.163	0.052	0.043	0.041	30°
					0.165	0.037	0.047	35°
						0.167	0.061	40°
							0.167	45°



e_{opt}
 $\beta/\phi = 1.0$



8-3

$N_{c\alpha\beta\delta}^{\circ}$

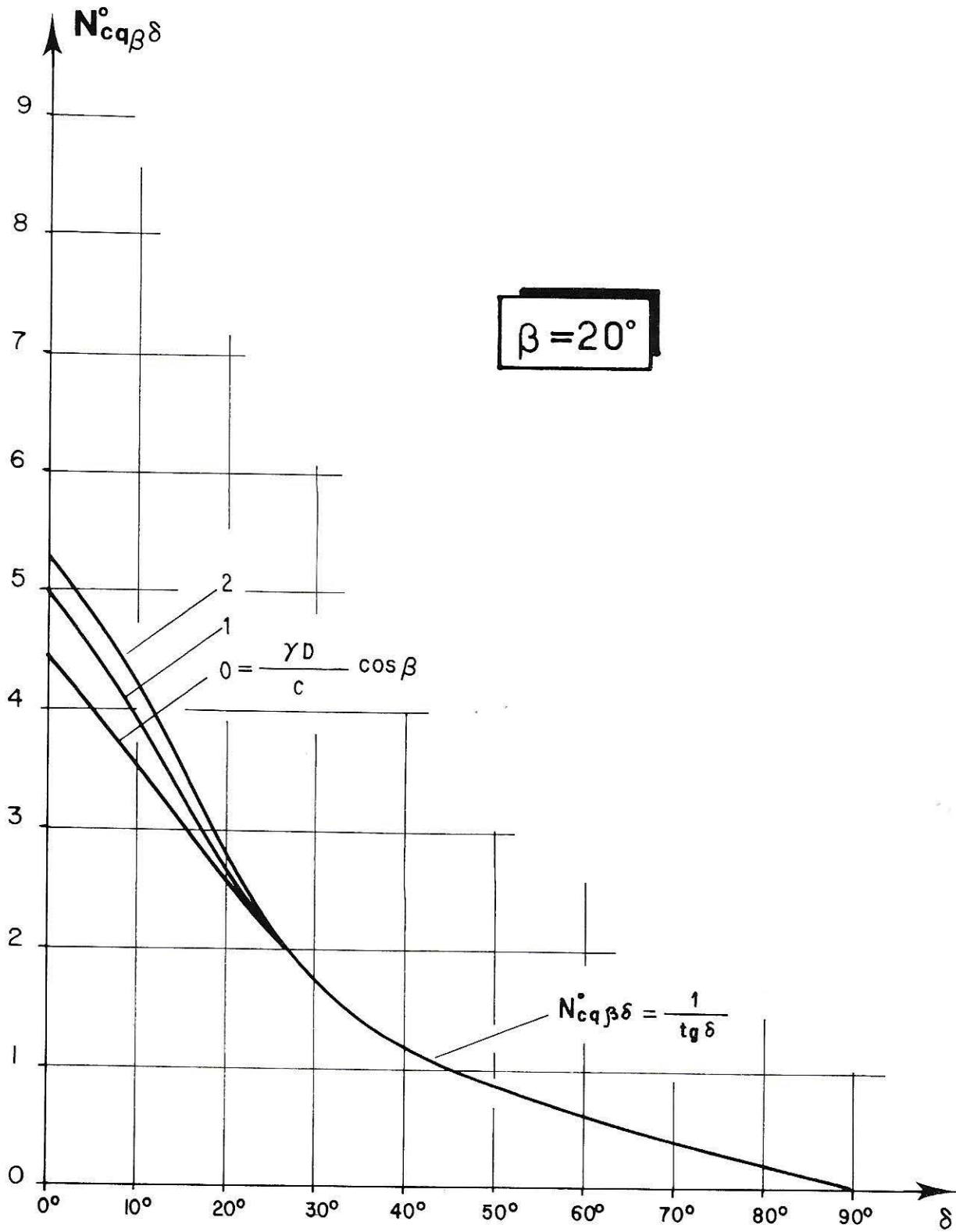
$\frac{2D \cos \beta}{c}$	δ									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0	4.79	4.32	3.80	3.23	2.67	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
1	5.58	5.02	4.35	3.58	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
2	6.34	5.69	4.84	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
3	7.05	6.30	5.24	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
4	7.68	6.84	5.53	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
5	8.16	7.24	5.66	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00

$\beta = 10^{\circ}$

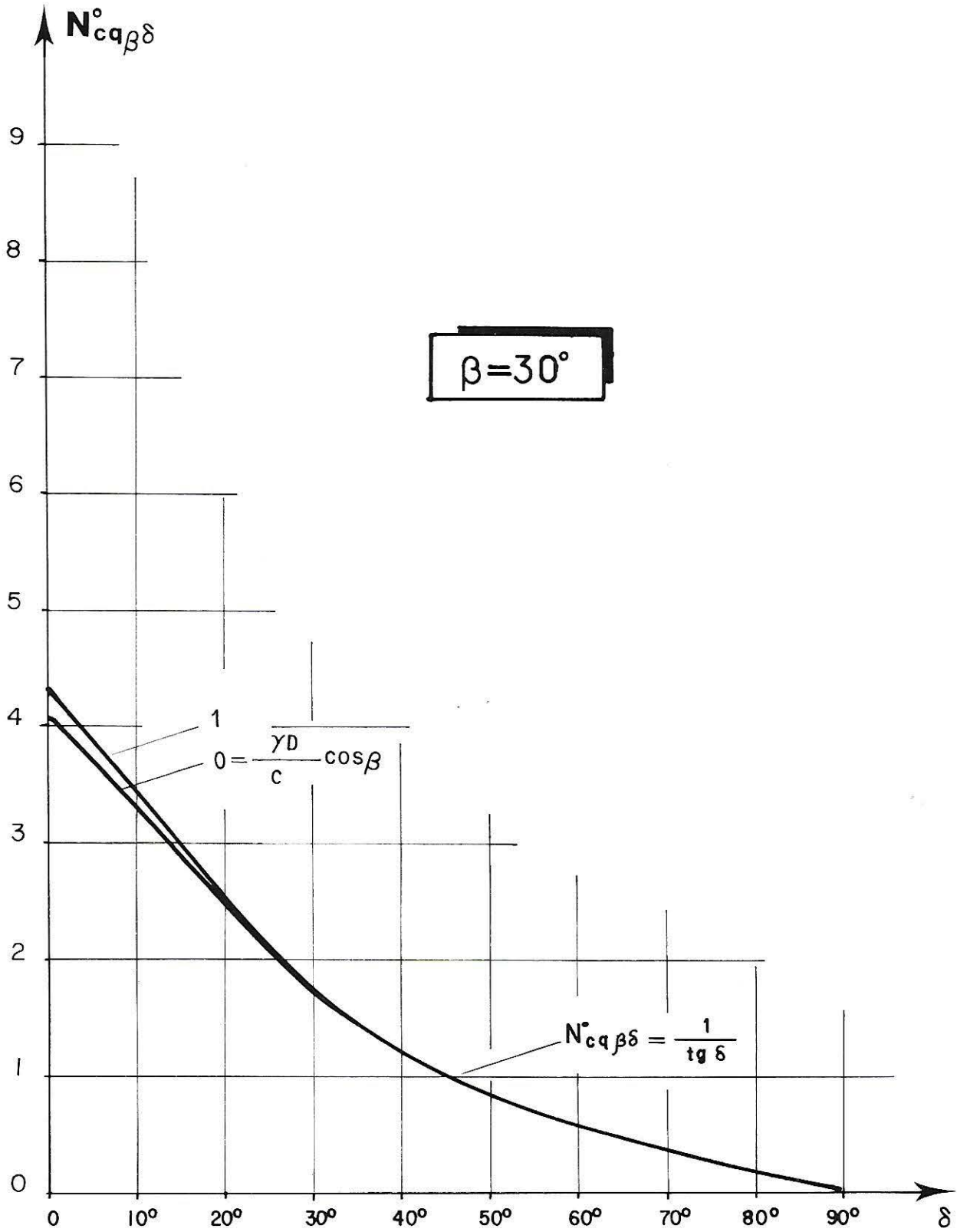
$N_{c\alpha\beta\delta}^{\circ}$

$\frac{V_D \cos \beta}{C}$	δ									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0	4.44	4.02	3.54	3.05	2.57	2.12	1.73	1.42	1.19	1.00
1	4.97	4.48	3.92	3.32	2.70	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
2	5.29	4.77	4.15	3.47	2.72	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00

$\beta = 20^{\circ}$



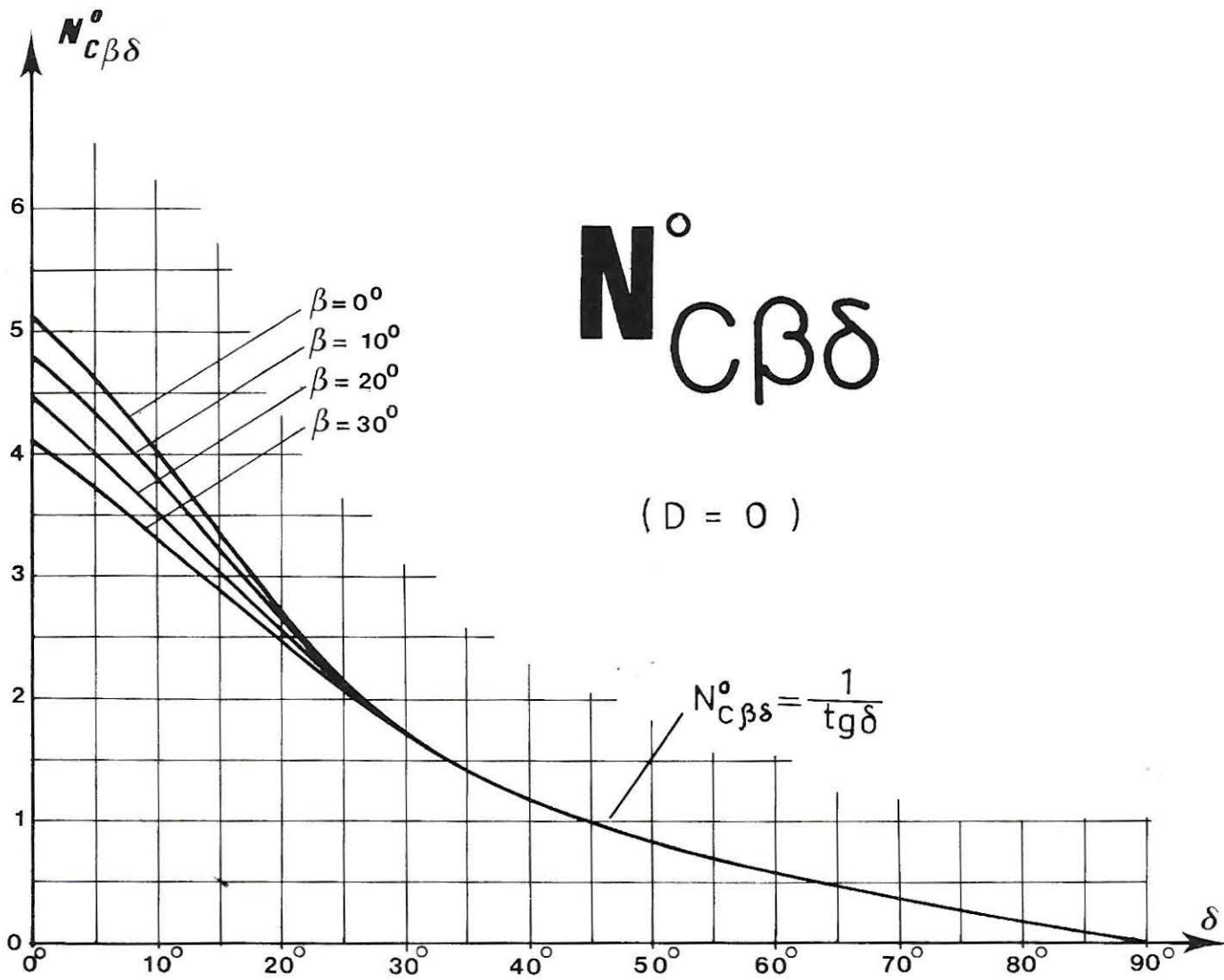
8-3



N° $c_{q\beta\delta}$

$\frac{V \cos \beta}{C}$	δ									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
1.0	4.09	3.70	3.29	2.86	2.44	2.06	1.73	1.42	1.19	1.00
0.5	4.30	3.89	3.44	2.98	2.52	2.10	1.73	1.42	1.19	1.00

 $\beta = 30^{\circ}$



8-3

EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$N_{\gamma\beta\delta}$ n'a pas d'expression analytique

$$N_{c\beta\delta} = \left(\frac{N_{q\beta\delta}}{\cos \beta} - 1 \right) \cotg \varnothing$$

$$N_{q\beta\delta} = \frac{1 + \sin \varnothing \cos (\Gamma + \delta^\bullet)}{1 - \sin \varnothing \cos (\Gamma_0 - \delta_0)} \cos \beta \exp [(\pi - 2\beta - \Gamma - \delta^\bullet - \Gamma_0 + \delta_0) \operatorname{tg} \varnothing]$$

$$\text{si } \pi - 2\beta - \Gamma - \delta^\bullet - \Gamma_0 + \delta_0 \geq 0$$

$$N_{q\beta\delta} = \frac{1 + \sin \varnothing \cos (\Gamma + \delta^\bullet)}{1 - \sin \varnothing \cos (\Gamma_0 - \delta_0)} \frac{\cos n - \sin \varnothing \cos m}{\cos n + \sin \varnothing \cos m} \cos \beta$$

$$\text{si } \pi - 2\beta - \Gamma - \delta^\bullet - \Gamma_0 + \delta_0 \leq 0$$

avec :

$$\Gamma = \operatorname{Arc} \sin \frac{\sin \delta^\bullet}{\sin \varnothing}$$

$$\Gamma_0 = \operatorname{Arc} \sin \frac{\sin \delta_0}{\sin \varnothing}$$

$$m = -\pi + \beta + \frac{\Gamma + \delta^\bullet + \Gamma_0 - \delta_0}{2}$$

$$\sin n = \sin \varnothing \sin m$$

Cas particuliers :

1 - Si $c = 0$ ($\rightarrow \delta_0 = \beta$)

$$N_{q\beta\delta} = \frac{(\cos \delta + \sin \varnothing \cos \Gamma) \cos \delta}{\cos \beta - \sin \varnothing \cos \Gamma_0} \exp [(\pi - \beta - \Gamma - \delta - \Gamma_0) \operatorname{tg} \varnothing]$$

$$\text{si } \pi - \beta - \Gamma - \delta - \Gamma_0 \geq 0$$

$$\text{avec } \Gamma_0 = \operatorname{Arc} \sin \frac{\sin \beta}{\sin \varnothing}$$

2 - Si $D = 0$ ($\rightarrow \delta_0 = 0$)

$$N_{c\beta\delta} = \left[\frac{(\cos \delta^\bullet + \sin \varnothing \cos \Gamma) \cos \delta}{1 - \sin \varnothing} \exp [(\pi - 2\beta - \Gamma - \delta^\bullet) \operatorname{tg} \varnothing] - 1 \right] \cotg \varnothing$$

3 - Si $\varnothing = 0$ et $D = 0$

$$\text{a) } N_{c\beta\delta}^0 = X \quad \text{si } X \leq 1/\operatorname{tg} \delta$$

avec :

$$X + \text{Arc sin}(X \text{ tg } \delta) - \sqrt{1 - X^2 \text{ tg}^2 \delta} = \pi + 1 - 2 \beta$$

$$b) N_{c\beta\delta}^0 = \text{cotg } \delta \quad \text{si } X > \text{cotg } \delta$$

4 - Si $\emptyset = 0$ et $D \neq 0$

$$a) N_{cq\beta\delta}^0 = X \quad \text{si } X \leq 1/\text{tg } \delta$$

avec :

$$\bullet \text{ si } \pi - 2 \beta - \omega_0 - \omega_1 \geq 0$$

$$X = \frac{\gamma D}{c} \cos^2 \beta + \pi - 2 \beta - \omega_0 + \cos \omega_0 - \omega_1 + \cos \omega_1$$

$$\bullet \text{ si } \pi - 2 \beta - \omega_0 - \omega_1 < 0$$

$$X = \frac{\gamma D}{c} \cos^2 \beta + \cos \omega_0 + \cos \omega_1 + 2 \cos \left(\beta + \frac{\omega_0 + \omega_1}{2} \right)$$

avec :

$$\sin \omega_0 = \frac{\gamma D}{c} \cos \beta \sin \beta$$

$$\left(\text{condition } \frac{\gamma D}{c} \cos \beta \sin \beta \leq 1 \right)$$

$$\sin \omega_1 = X \text{ tg } \delta$$

$$b) N_{cq\beta\delta}^0 = \text{cotg } \delta \quad \text{si } X > \text{cotg } \delta.$$

8-3

BIBLIOGRAPHIE

L'étude théorique de cette section et les premiers résultats numériques se trouvent dans la thèse de Trân-Vô-Nhiêm [1].

REFERENCE

- [1] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur (Université de Grenoble, Février 1971), 198-254.

**FONDATION A BASE OBLIQUE
EXERÇANT UNE CHARGE INCLINÉE ET EXCENTRÉE**

(Fondation de mur de soutènement ou de massif d'appui)
sur un sol homogène horizontal

SOMMAIRE

- Définition du sol
- Définition de la charge
- Calcul de la pression limite
- Tables et Graphiques
- Expression des coefficients
- Bibliographie

DEFINITION DU SOL

Le sol est limité supérieurement par un plan horizontal. (Toutefois, la pression limite ne change pratiquement pas si la surface du sol est plus haute, du côté où la fondation est le plus enfoncée, que de l'autre côté.) Il est supposé homogène sur une épaisseur infinie. En pratique, si la couche de sol repose sur une autre plus dure, son épaisseur H en dessous du point le plus bas de la base de la fondation doit être suffisante pour que les lignes de glissement puissent se développer. Une approximation, par excès, de cette épaisseur H s'obtient en faisant comme si la base de la fondation était horizontale et la charge verticale centrée^(*).

DEFINITION DE LA CHARGE

La fondation est de longueur infinie. Sa base est rigide et a pour largeur constante B. Elle fait avec l'horizontale un angle ω . Son point le plus haut est situé à la profondeur D (Fig. 1). La forme des parois de la fondation (notamment l'angle qu'elles font avec la base) n'a pas d'influence sur la valeur de la charge limite (du moins en première approximation). La base exerce sur le sol une charge inclinée d'un angle δ . La valeur limite (à la rupture) de cette charge est désignée par f_{lim} (force par unité de longueur). La pression limite, ou pression portante, est le quotient de la composante normale de la charge limite par la largeur de la fondation :

$$(1) \quad p_{lim} = f_{lim} \cos \delta / B = f_n \lim / B.$$

L'angle δ n'est pas orienté et, par conséquent, il n'a pas de signe. L'inclinaison fictive, δ^\bullet , est définie par^(**) :

$$(2) \quad \delta^\bullet = \text{Arctg} \frac{p_{lim} \text{tg} \delta}{p_{lim} + c \cotg \phi}$$

(*) Voir la section intitulée "Fondation à base horizontale exerçant une charge verticale centrée sur un sol homogène horizontal" (Section 8-1, § "Définition du sol").

(**) En toute rigueur, il faudrait faire intervenir les coefficients de réduction r_{cq} et r_γ définis plus loin. Mais ceci compliquerait considérablement la formule (2) pour un gain de précision négligeable.

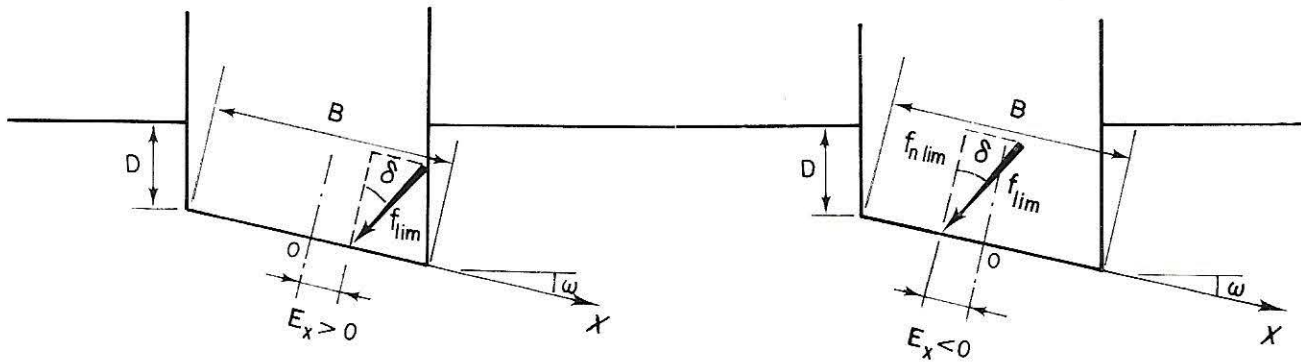


FIG. 1. — Définition du sol et de la fondation à base oblique exerçant une charge inclinée et excentrée. Notre étude est limitée aux cas où la charge est inclinée vers le côté le plus profond de la fondation (autrement dit, sa composante tangentielle est dirigée vers le haut). En particulier, le cas d'une charge verticale n'est pas considéré. Par convention, l'axe Ox est orienté dans le sens opposé à la composante tangentielle de la charge. Si le point bas de la base était à gauche (et si, par conséquent, la charge était inclinée à gauche), on aurait des dessins symétriques de ceux donnés ci-dessus, avec l'axe Ox orienté vers la gauche. Ces deux cas n'ont pas été dessinés car ils sont identiques à ceux figurés ci-dessus. Enfin, l'angle ω n'a pas de signe.

avec :

- δ^\bullet : inclinaison fictive de la charge
- δ : inclinaison réelle de la charge
- p_{lim} : pression limite
- c : cohésion du sol
- ϕ : angle de frottement interne du sol.

Une excellente approximation de (2) est donnée par :

$$(3) \quad \delta^\bullet = \frac{\delta}{1 + (c \cotg \phi \cos \delta / p_{lim})}.$$

Comme l'angle δ , l'angle δ^\bullet n'a pas de signe. L'inclinaison fictive doit respecter la condition suivante :

$$(4) \quad \delta^\bullet \leq \phi.$$

Si la cohésion est nulle ($c = 0$); l'inclinaison fictive est égale à l'inclinaison réelle :

$$(5) \quad \delta^\bullet = \delta.$$

Le seul cas envisagé ici est celui d'une charge inclinée vers le côté le plus profond de la fondation. Autrement dit, c'est le cas où la composante tangentielle de la charge est orientée vers le haut (voir Fig. 1)

Le point d'application de la charge se trouve à une distance E_x de l'axe de la fondation (Fig. 1). Le signe de E_x est donné par l'axe OX qui par convention est orienté du côté opposé à celui de la composante tangentielle de la charge. On définit l'excentricité e_x de la charge par :

$$(6) \quad e_x = E_x/B.$$

L'excentricité e_x a le même signe que E_x . Elle peut donc être positive ou négative dans les limites suivantes :

$$(7) \quad -0,5 \leq e_x \leq 0,5.$$

CALCUL DE LA PRESSION LIMITE

La pression limite est donnée par :

$$(8) \quad P_{\text{lim}} = cr_{c\phi} N_{c\omega\delta} + \gamma Dr_{c\phi} N_{q\omega\delta} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\omega\delta}$$

avec :

- c : cohésion du sol
- B : largeur de la fondation
- γ : poids volumique du sol

D : profondeur du point le plus haut de la base de la fondation
(Fig. 1)

r_{cq} et r_{γ} : coefficients de réduction définis par (9) et (10)

$N_{c\omega\delta}$, $N_{q\omega\delta}$ et $N_{\gamma\omega\delta}$: coefficients sans dimensions dépendant de ϕ , ω et δ^{\bullet}

ϕ : angle de frottement interne du sol

δ^{\bullet} : inclinaison fictive définie par (2) et (3)

ω : inclinaison de la base de la fondation (valeur toujours positive quel que soit le sens de cette inclinaison).

Les coefficients de réduction r_{cq} et r_{γ} sont compris entre 0 et 1. Ils sont donnés par les formules suivantes :

$$(9) \quad r_{cq} = 1 - 2|e_x|$$

$$(10) \quad r_{\gamma} = \left(\frac{1 \pm 2 e_x}{1 \pm 2 e_{opt}} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \text{signe + si } e_{opt} > e_x \\ \text{signe - si } e_{opt} < e_x \end{array}$$

e_x est algébrique (positif ou négatif) et e_{opt} est toujours positif.

La détermination de e_x se fait par la formule (6).

Les valeurs numériques de e_{opt} , excentricité optimale pour laquelle $r_{\gamma} = 1$, sont données dans un graphique. Notons que e_{opt} est pratiquement indépendant de ω ($10^{\circ} \leq \omega \leq 40^{\circ}$).

Les valeurs numériques des coefficients $N_{c\omega\delta}$, $N_{q\omega\delta}$ et $N_{\gamma\omega\delta}$ sont données ci-après sous forme de graphiques.

Plusieurs cas sont à considérer :

- Cas général ($c \neq 0$, $\phi \neq 0$) :

On voit d'après les formules (2) ou (3) que δ^{\bullet} dépend de p_{lim} que l'on cherche. Il faudra donc procéder par approximations successives en remarquant, pour démarrer, que δ^{\bullet} est inférieur à δ . On obtient alors une valeur par défaut de la pression limite si l'on fait un premier calcul en remplaçant δ^{\bullet} par δ . Notons que cette approximation est d'autant meilleure que δ est faible et qu'elle est impossible si δ est supérieur à ϕ .

- Cas du sol sans cohésion ($c = 0$) :

On a alors $\delta^{\bullet} = \delta$. Le calcul est direct (sans approximations successives)

- Cas du sol sans frottement ($\phi = 0$) :

On a alors :

$$(11) \quad N_{\gamma\omega\delta}^0 = \sin \omega \quad N_{q\omega\delta}^0 = 1.$$

Dans ce cas, il est préférable de grouper les trois coefficients $N_{c\omega\delta}^0$, $N_{q\omega\delta}^0$, $N_{\gamma\omega\delta}^0$ en un seul appelé $N_{cq\gamma\omega\delta}^0$:

$$(12) \quad p_{\text{lim}} = (1 - 2|e_x|) c N_{cq\gamma\omega\delta}^0.$$

Les valeurs numériques de $N_{cq\gamma\omega\delta}^0$ sont données dans trois graphiques pour $\omega = 10^\circ$, 20° et 30° .

Notons que :

$$(13) \quad N_{cq\gamma\omega\delta}^0 \leq 1/\text{tg } \delta.$$

- Cas de la charge normale excentrée ($\delta = 0$) :

La formule (6) devient alors :

$$(14) \quad p_{\text{lim}} = cr_{cq} N_{c\omega} + \gamma Dr_{cq} N_{q\omega} + \frac{1}{2} \gamma Br_{\gamma} N_{\gamma\omega}.$$

Les trois coefficients $N_{c\omega}$, $N_{q\omega}$ et $N_{\gamma\omega}$ sont ceux relatifs à la charge normale centrée sur une fondation à base oblique. On trouve leurs valeurs numériques :

- soit en se reportant à la section intitulée "Fondation à base oblique exerçant une charge normale centrée sur un sol homogène à surface horizontale" (Section 7-9),

- soit dans les graphiques ci-après, pour $\delta^{\bullet} = 0$.

On notera une très légère différence entre les valeurs de $N_{\gamma\omega}$ provenant de ces deux sources : ceci est dû à une légère différence de méthode de calcul pour obtenir ces coefficients. Néanmoins la concordance est suffisante pour les applications pratiques.

Exemple 1 :

Considérons le massif d'appui défini sur la Fig. 2. Les propriétés du sol sont $e = 0,1 \text{ bar}$ (210 lb/sq. ft), $\phi = 35^\circ$, $\gamma = 1,84 \text{ g/cm}^3$ (115 lb/cu. ft). Quelle est la pression limite ?

Calculons d'abord :

$$\gamma D = 1\,840 \times 1,2 \times 9,81 \times 10^{-5} = 0,22 \text{ bar}$$

$$= 115 \times 4 = 460 \text{ lb/sq. ft}$$

$$\frac{1}{2} \gamma B = 0,5 \times 1\,840 \times 1,8 \times 9,81 \times 10^{-5} = 0,16 \text{ bar}$$

$$= 0,5 \times 115 \times 6 = 345 \text{ lb/sq. ft.}$$

Pour $\omega = 20^\circ$, $\phi = 35^\circ$ et $\delta^* = 15^\circ$, les graphiques donnent :

$$e_{\text{opt}} = + 0,024$$

$$N_{c\omega\delta} = 14 \quad N_{q\omega\delta} = 11 \quad N_{\gamma\omega\delta} = 7,5.$$

La formule (6) donne :

$$e_x = 10/180 = 4/6 \times 12 = 0,055.$$

La formule (9) donne :

$$r_{cq} = 1 - 0,11 = 0,89.$$

La formule (10) donne :

$$r_\gamma = \left(\frac{1 - 0,11}{1 - 0,048} \right)^2 = 0,875.$$

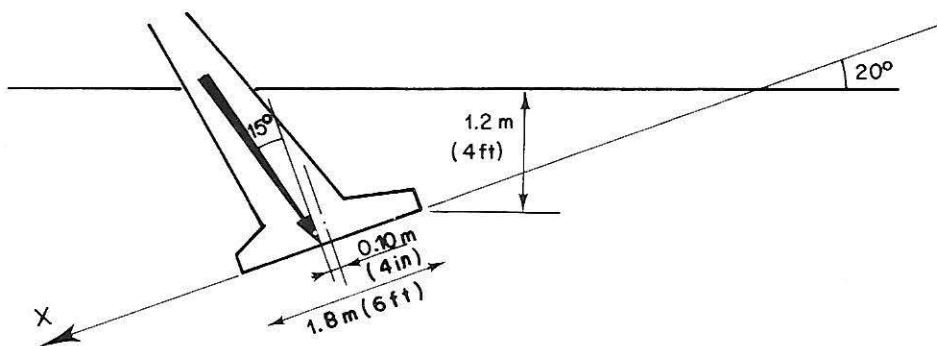


FIG. 2. — Définition de la semelle oblique de l'exemple 1.

La formule (8) permet alors un premier calcul de p_{lim} :

$$p_{lim} = 0,1 \times 0,89 \times 14 + 0,22 \times 0,89 \times 11 + 0,16 \times 0,875 \times 7,5 = 4,45 \text{ bars}$$

$$p_{lim} = 210 \times 0,89 \times 14 + 460 \times 0,89 \times 11 + 345 \times 0,875 \times 7,5 = 9\,300 \text{ lb/sq. ft.}$$

Mais ce calcul n'est qu'une première approximation car on a supposé, pour le faire, que δ^\bullet était égal à δ . On peut maintenant calculer une valeur de δ^\bullet plus approchée, à l'aide de la formule (2) ou (3) :

$$\begin{aligned} \delta^\bullet &= \frac{15}{1 + (0,1 \times 1,428 \times 0,966/4,45)} = 14,5^\circ \\ &= \frac{15}{1 + (210 \times 1,428 \times 0,966/9\,300)} = 14,5^\circ. \end{aligned}$$

Cette valeur de δ^\bullet est très voisine de la valeur 15° choisie arbitrairement. En refaisant le calcul de p_{lim} avec la nouvelle valeur de δ^\bullet , on obtiendrait une valeur plus exacte, mais très voisine de celle obtenue plus haut. Une telle précision est superflue. Toutefois, lorsque la cohésion du sol est plus importante, la convergence des approximations successives est moins rapide.

Exemple 2 :

Considérons la même fondation que dans l'exemple 1, avec les modifications suivantes des propriétés du sol : $\phi = 0^\circ$ et $c = 0,6 \text{ bar}$ (1 250 lb/sq. ft). Quelle est la pression limite ?

Les termes γD et γB ayant la même valeur que dans l'exemple 1, on peut calculer :

$$\left[\frac{\gamma D}{c} + 0,17 \frac{\gamma B}{c} \right] = 0,46.$$

En portant cette valeur dans le graphique de $N_{cq\gamma\omega\delta}^0$ relatif à $\omega = 20^\circ$, on lit, pour $\delta = 15^\circ$:

$$N_{cq\gamma\omega\delta}^0 = 3,2$$

d'où, d'après la formule (12) :

$$\begin{aligned} p_{lim} &= 0,89 \times 0,6 \times 3,2 = 1,7 \text{ bar} \\ &= 0,89 \times 1\,250 \times 3,2 = 3\,550 \text{ lb/sq. ft.} \end{aligned}$$

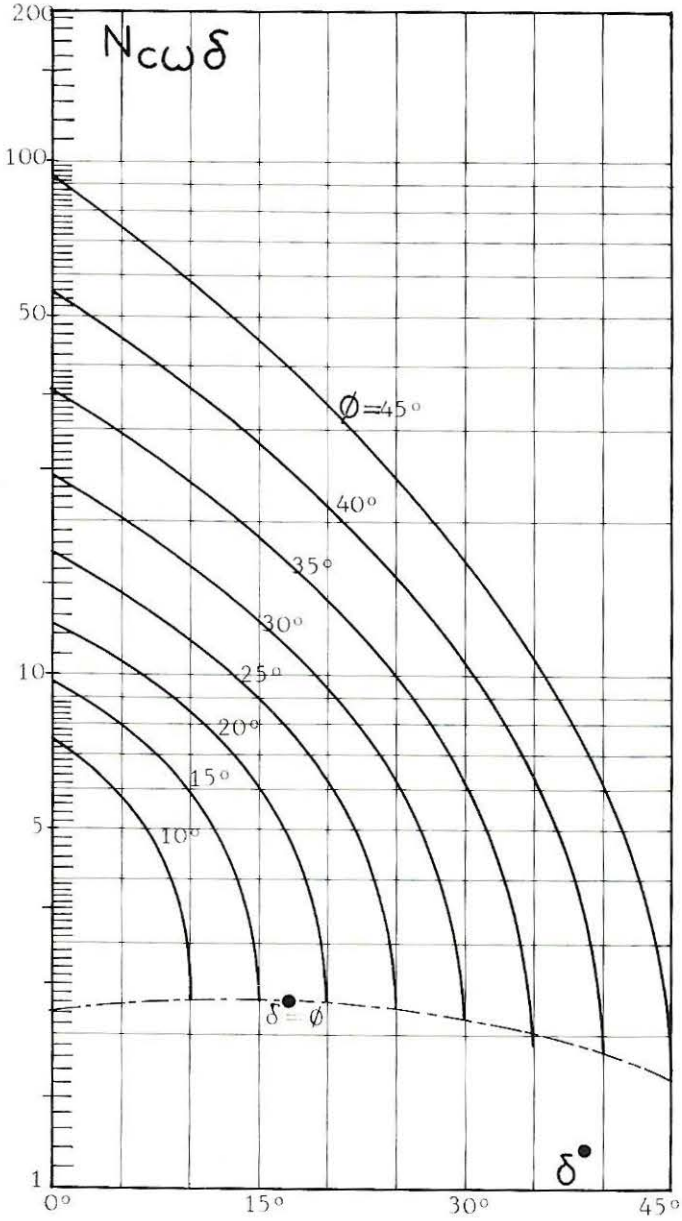
TABLES ET GRAPHIQUES

$N_{c\omega\delta}$	p. 404-411
(Noter que l'on retrouve les valeurs de ce coefficient en remplaçant β par ω dans $N_{c\beta\delta}$ pour $\delta_0 = 0$ dans la section 8-3.)	
$N_{q\omega\delta}$	p. 412-419
$N_{\gamma\omega\delta}$	p. 420-427
e_{opt}	p. 428-429
$N_{cq\gamma\omega\delta}^0$	p. 430-435

$N_{c\omega\delta}$

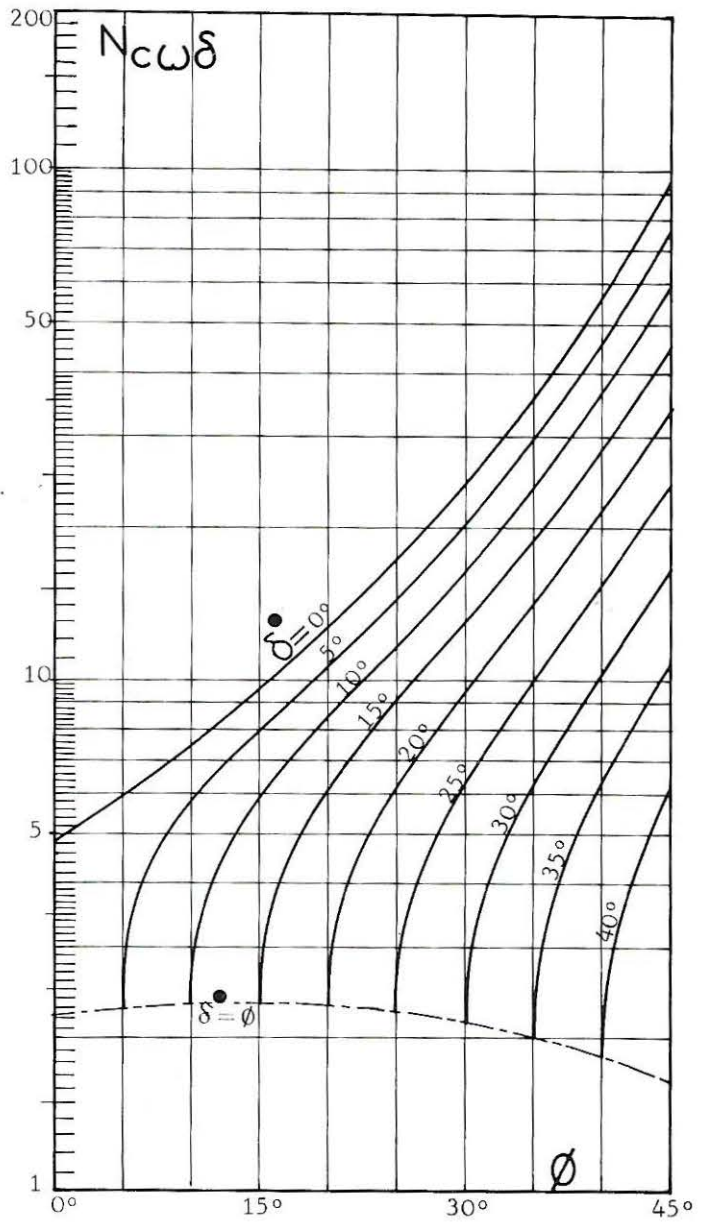
$$\omega = 10^\circ$$

δ° / Φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	5.94	7.50	9.66	12.73	17.28	24.32	35.81	55.88	94.13	175.77
0.1	5.77	7.22	9.19	11.94	15.94	21.96	31.51	47.64	77.10	136.88
0.2	5.58	6.91	8.69	11.12	14.57	19.62	27.39	40.03	62.12	104.58
0.3	5.37	6.58	8.16	10.27	13.18	17.33	23.49	33.11	49.14	78.26
0.4	5.15	6.22	7.60	9.39	11.79	15.10	19.83	26.89	38.08	57.19
0.5	4.89	5.83	7.00	8.49	10.40	12.95	16.43	21.38	28.79	40.65
0.6	4.61	5.41	6.37	7.55	9.01	10.87	13.29	16.54	21.12	27.91
0.7	4.29	4.94	5.69	6.57	7.62	8.87	10.41	12.34	14.86	18.30
0.8	3.91	4.40	4.94	5.54	6.20	6.93	7.76	8.71	9.83	11.19
0.9	3.47	3.73	4.05	4.37	4.69	4.99	5.27	5.54	5.78	6.00
1	2.29	2.33	2.34	2.31	2.25	2.15	2.01	1.84	1.64	1.40



$$N_c \omega \delta$$

$$\omega = 10^\circ$$

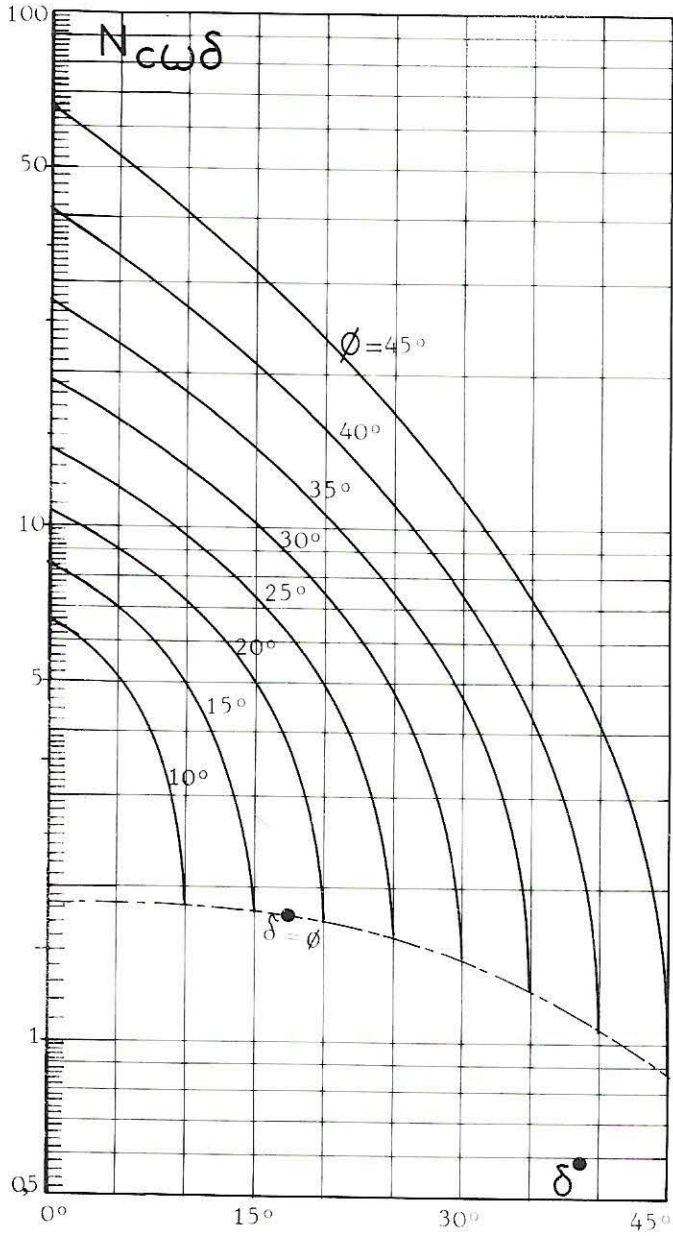


8-4

$N_{c\omega\delta}$

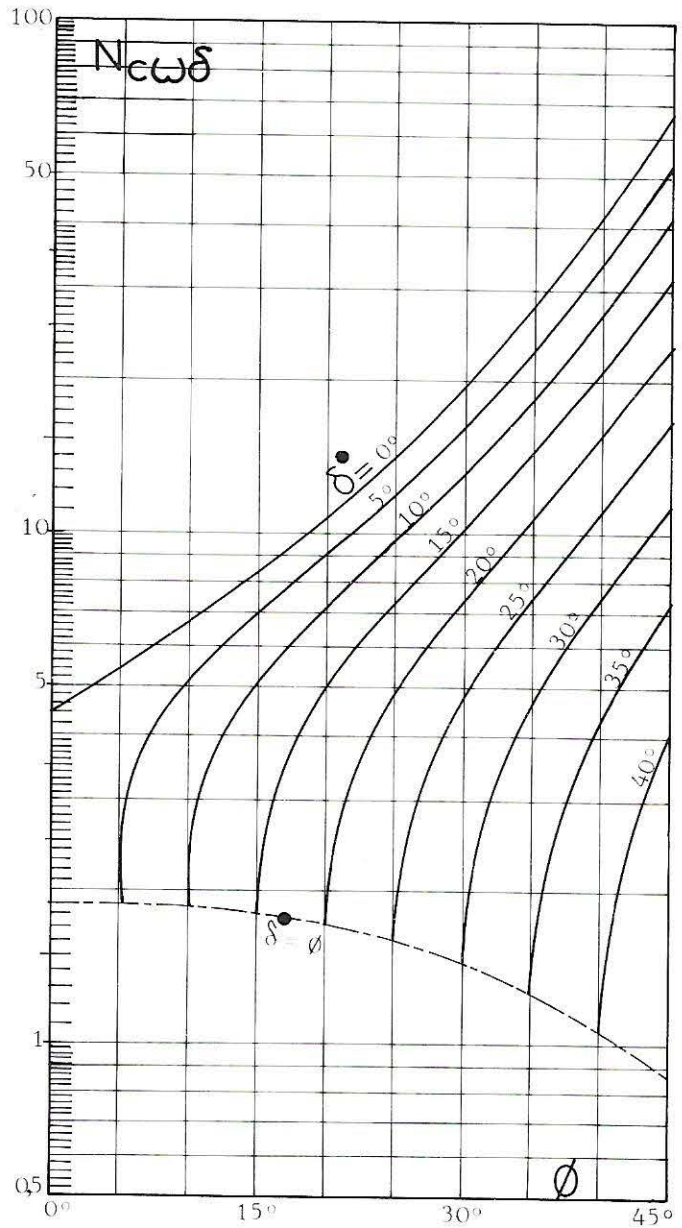
$$\omega = 20^\circ$$

δ/Φ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	5.42	6.72	8.46	10.88	14.36	19.56	27.73	41.39	66.10	115.66
0.1	5.25	6.45	8.03	10.19	13.22	17.63	24.37	35.24	54.09	90.01
0.2	5.07	6.16	7.58	9.47	12.06	15.72	21.14	29.56	43.52	68.70
0.3	4.87	5.85	7.10	8.72	10.88	13.85	18.09	24.40	34.37	51.34
0.4	4.65	5.51	6.59	7.94	9.70	12.03	15.22	19.76	26.56	37.44
0.5	4.40	5.15	6.05	7.15	8.52	10.27	12.55	15.65	20.01	26.53
0.6	4.13	4.75	5.47	6.32	7.34	8.57	10.10	12.04	14.60	18.13
0.7	3.82	4.31	4.85	5.46	6.15	6.93	7.84	8.90	10.19	11.79
0.8	3.45	3.80	4.17	4.55	4.94	5.35	5.77	6.20	6.64	7.10
0.9	2.97	3.17	3.36	3.52	3.66	3.76	3.82	3.83	3.78	3.67
1	1.88	1.85	1.80	1.71	1.59	1.44	1.27	1.07	0.86	0.64



$N_{c\omega\delta}$

$\omega = 20^\circ$

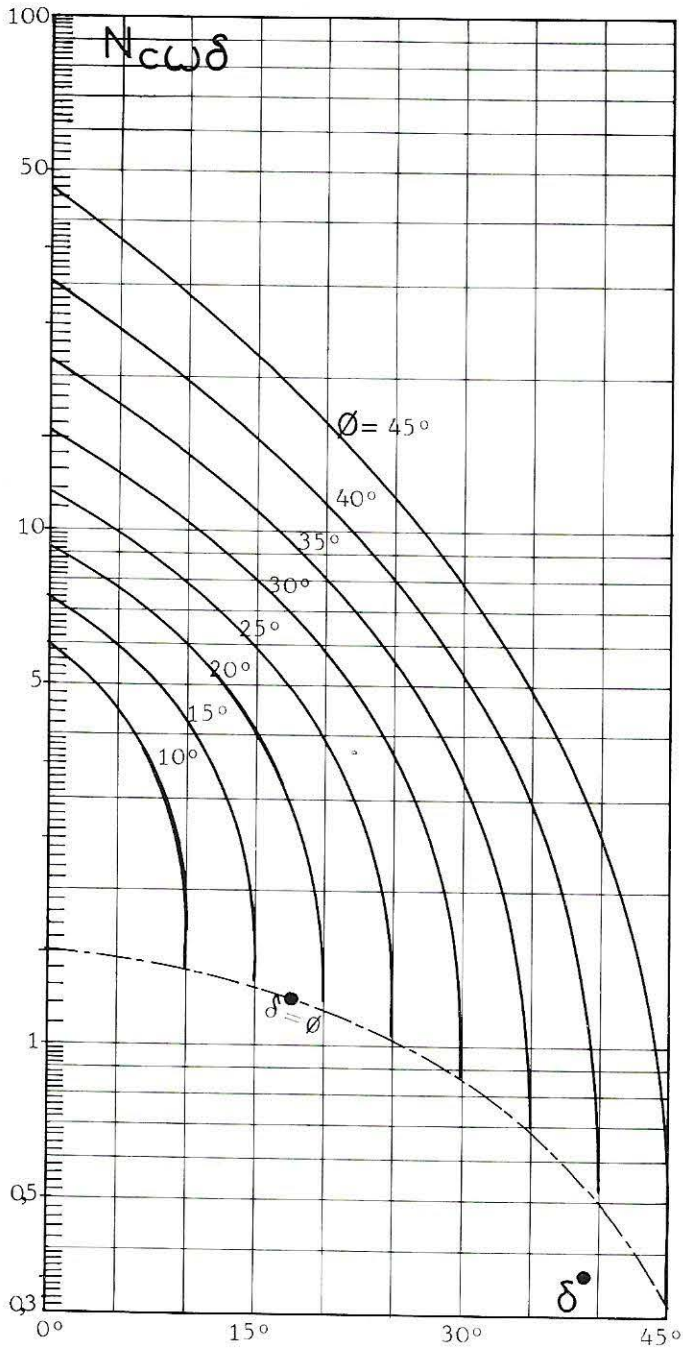


8-4

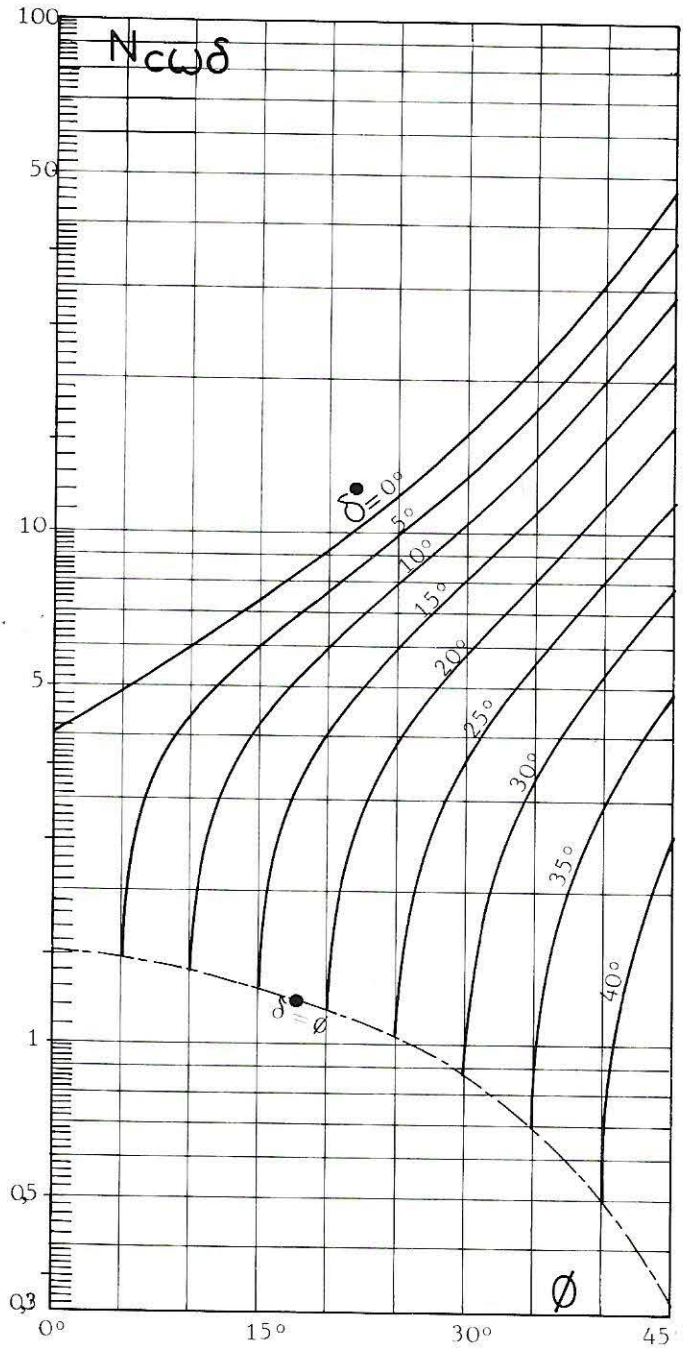
$N_{c\omega\delta}$

$$\omega = 30^\circ$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	4.92	5.98	7.37	9.26	11.88	15.67	21.41	30.58	46.32	76.01
0.1	4.75	5.72	6.98	8.65	10.91	14.10	18.77	25.99	37.85	59.09
0.2	4.57	5.45	6.57	8.01	9.92	12.54	16.25	21.75	30.40	45.04
0.3	4.38	5.16	6.13	7.35	8.92	11.01	13.85	17.90	23.94	33.58
0.4	4.16	4.84	5.66	6.67	7.92	9.52	11.61	14.44	18.44	24.41
0.5	3.93	4.50	5.17	5.97	6.92	8.08	9.52	11.37	13.82	17.21
0.6	3.66	4.13	4.65	5.24	5.91	6.69	7.60	8.68	10.00	11.67
0.7	3.36	3.71	4.08	4.48	4.90	5.35	5.83	6.34	6.89	7.49
0.8	3.00	3.23	3.46	3.68	3.88	4.06	4.21	4.32	4.39	4.39
0.9	2.54	2.64	2.73	2.77	2.79	2.76	2.68	2.55	2.37	2.13
1	1.47	1.40	1.30	1.18	1.03	0.86	0.68	0.49	0.31	0.14



$N_{c\omega\delta}$
 $\omega = 30^\circ$

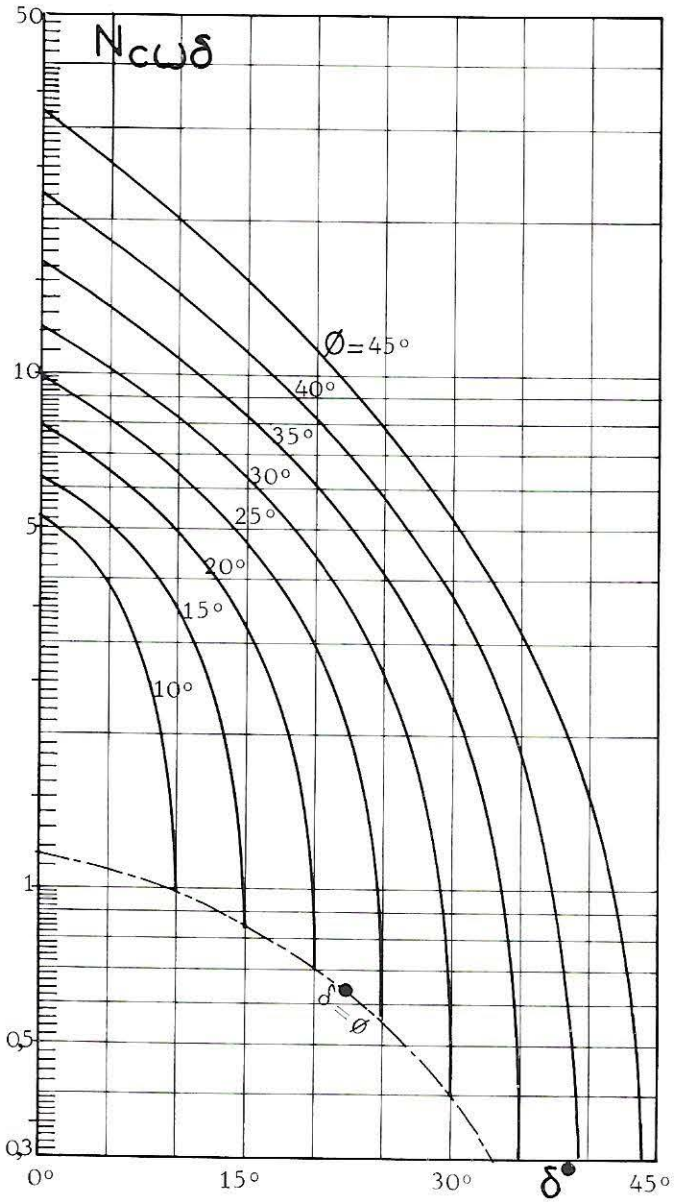


8-4

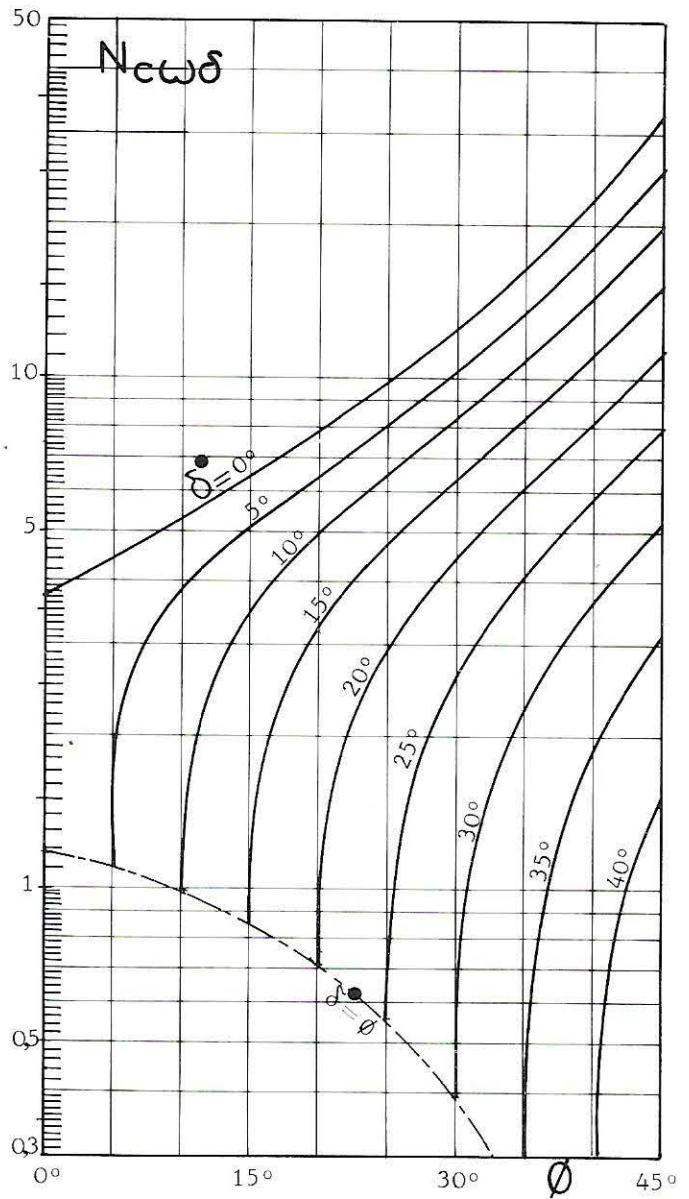
$N_{c\omega\delta}$

$$\omega = 40^\circ$$

δ/ϕ	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	4.42	5.28	6.38	7.82	9.77	12.50	16.46	22.51	32.38	49.86
0.1	4.27	5.04	6.02	7.29	8.95	11.21	14.39	19.08	26.40	38.69
0.2	4.09	4.79	5.65	6.72	8.11	9.93	12.41	15.93	21.15	29.42
0.3	3.90	4.51	5.25	6.14	7.26	8.68	10.54	13.05	16.59	21.86
0.4	3.70	4.22	4.82	5.54	6.41	7.46	8.78	10.47	12.71	15.82
0.5	3.46	3.89	4.38	4.93	5.55	6.28	7.15	8.18	9.45	11.07
0.6	3.21	3.54	3.90	4.29	4.70	5.15	5.64	6.17	6.76	7.41
0.7	2.91	3.15	3.39	3.62	3.84	4.06	4.25	4.43	4.56	4.65
0.8	2.56	2.70	2.82	2.91	2.97	3.00	2.98	2.92	2.80	2.61
0.9	2.12	2.15	2.15	2.12	2.05	1.94	1.79	1.60	1.38	1.12
1	1.09	0.98	0.85	0.71	0.55	0.39	0.23	0.08	0	0



$N_c \omega \delta$
 $\omega = 40^\circ$

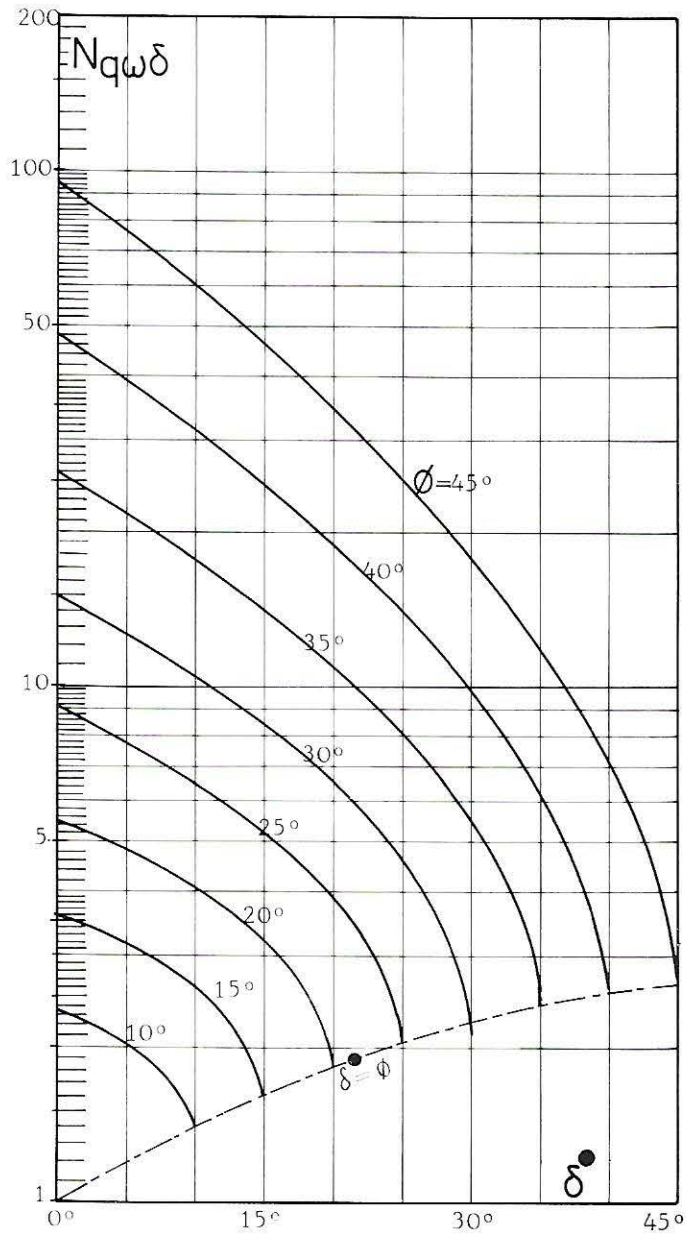


8-4

$N_{q\omega\delta}$

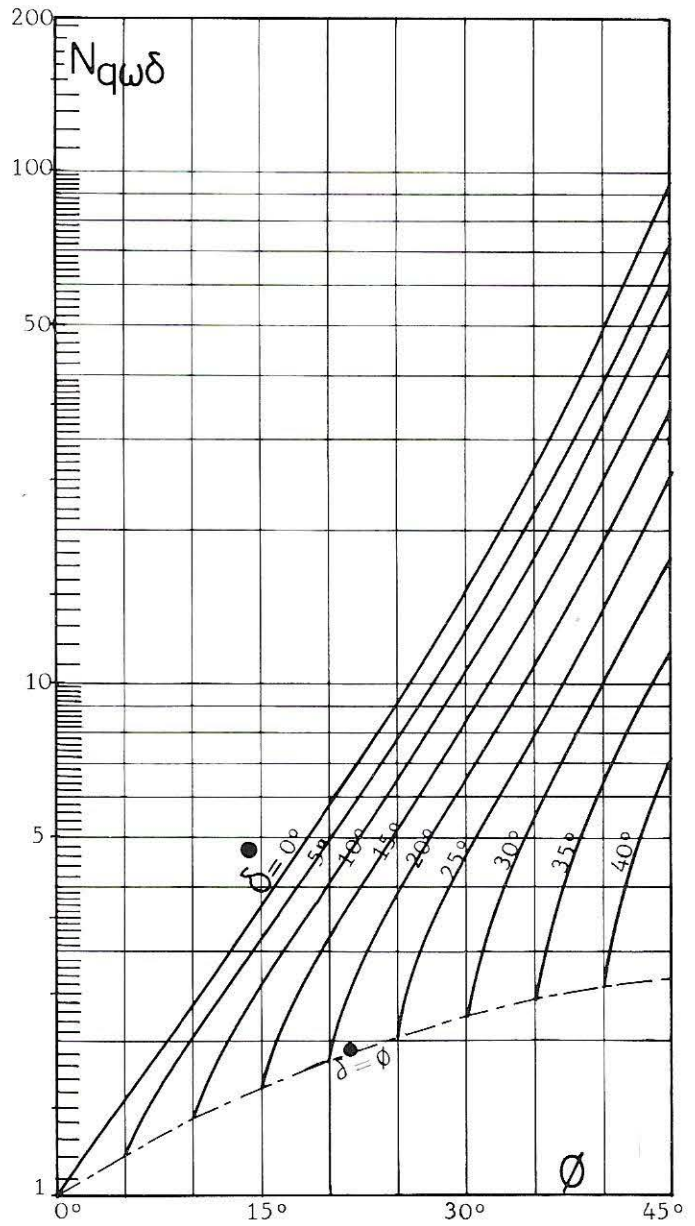
$$\omega = 10^\circ$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.52	2.32	3.58	5.63	9.06	15.04	26.07	47.89	95.13	210.47
0.1	1.50	2.27	3.46	5.34	8.43	13.68	23.06	40.97	78.10	164.13
0.2	1.48	2.21	3.32	5.04	7.79	12.33	20.18	34.59	63.12	125.64
0.3	1.47	2.16	3.18	4.74	7.15	11.01	17.45	28.78	50.14	94.26
0.4	1.45	2.09	3.03	4.42	6.50	9.72	14.88	23.57	39.08	69.16
0.5	1.42	2.02	2.87	4.09	5.85	8.47	12.50	18.94	29.79	49.45
0.6	1.40	1.95	2.70	3.74	5.20	7.27	10.30	14.88	22.12	34.27
0.7	1.37	1.87	2.52	3.39	4.55	6.12	8.29	11.36	15.86	22.81
0.8	1.34	1.77	2.32	3.01	3.89	5.00	6.43	8.31	10.83	14.34
0.9	1.29	1.65	2.08	2.59	3.18	3.88	4.69	5.65	6.78	8.15
1	1.20	1.41	1.62	1.84	2.05	2.24	2.41	2.54	2.64	2.67



$$Nq\omega\delta$$

$$\omega = 10^\circ$$

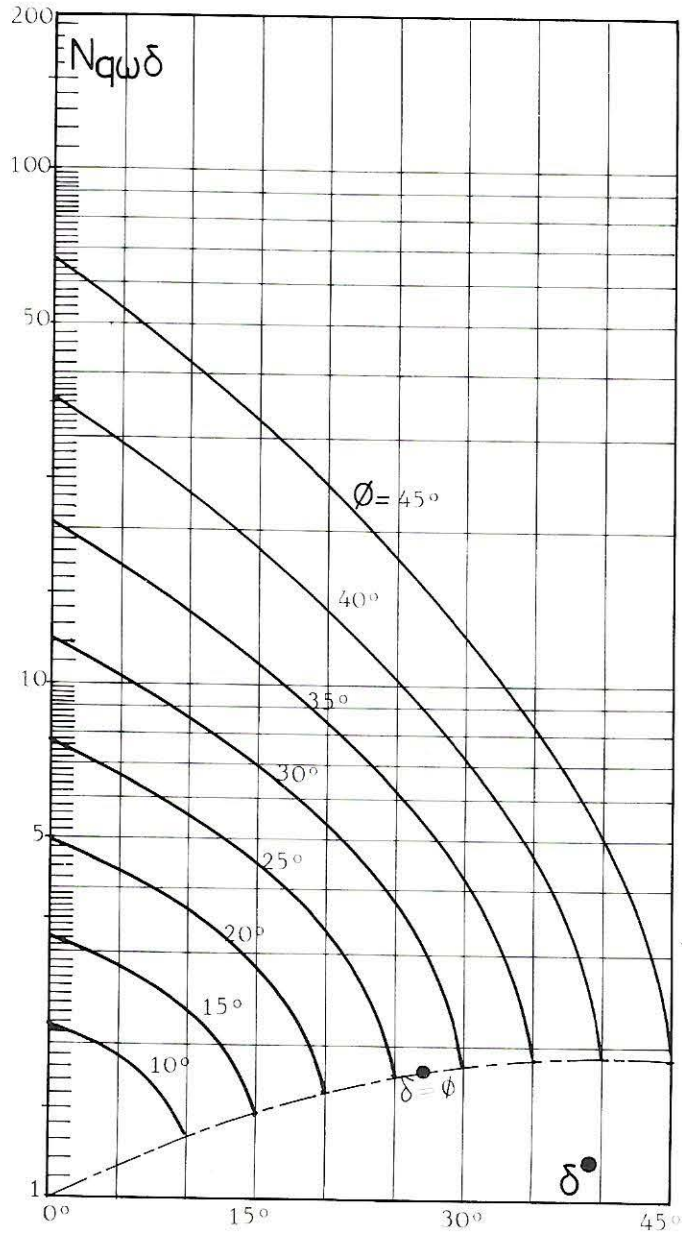


8-4

$N_{q\omega\delta}$

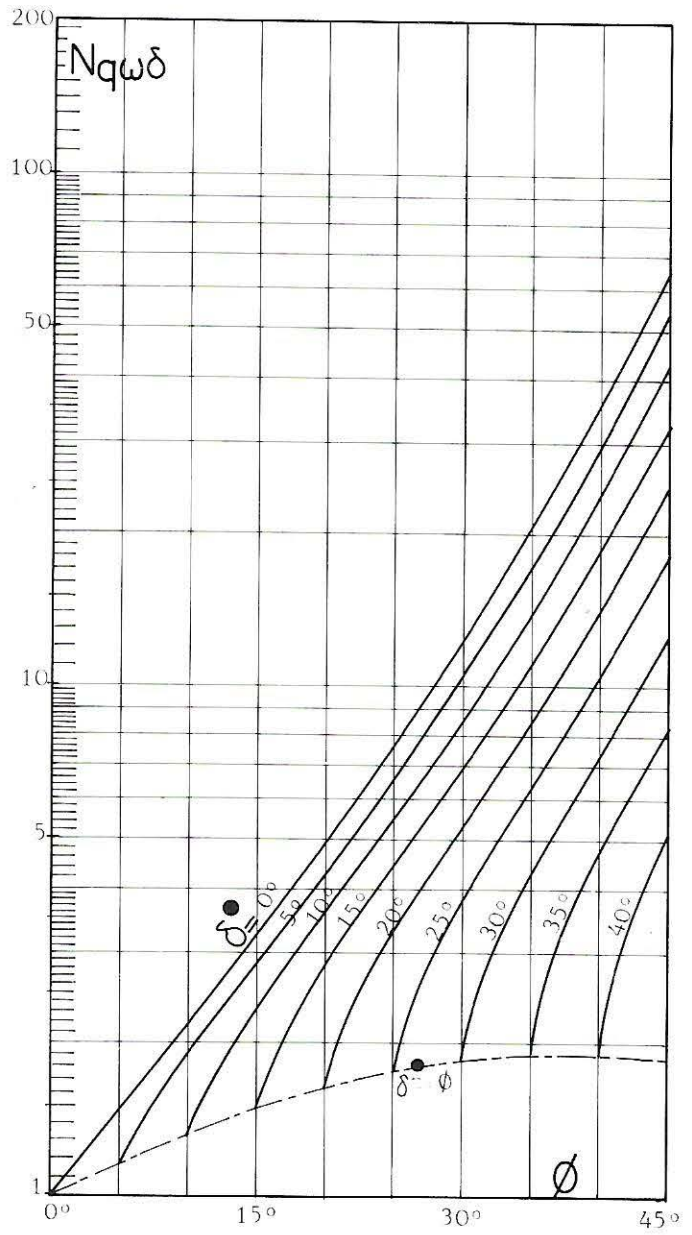
$$\omega = 20^\circ$$

$\frac{\delta^\circ}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.47	2.18	3.26	4.96	7.69	12.29	20.42	35.73	67.10	138.84
0.1	1.46	2.13	3.15	4.71	7.16	11.18	18.06	30.57	55.09	108.27
0.2	1.44	2.08	3.03	4.44	6.62	10.08	15.80	25.80	44.52	82.88
0.3	1.42	2.03	2.90	4.17	6.07	9.00	13.66	21.47	35.37	62.18
0.4	1.40	1.97	2.76	3.89	5.52	7.94	11.65	17.58	27.56	45.62
0.5	1.38	1.90	2.62	3.60	4.97	6.93	9.79	14.13	21.01	32.62
0.6	1.36	1.83	2.46	3.30	4.42	5.95	8.07	11.10	15.60	22.60
0.7	1.33	1.76	2.30	2.98	3.87	5.00	6.49	8.47	11.19	15.05
0.8	1.30	1.67	2.11	2.65	3.30	4.09	5.04	6.20	7.64	9.46
0.9	1.26	1.56	1.90	2.28	2.70	3.17	3.67	4.21	4.78	5.37
1	1.16	1.32	1.48	1.62	1.74	1.83	1.89	1.90	1.86	1.76



$$Nq\omega\delta$$

$$\omega = 20^\circ$$



8-4

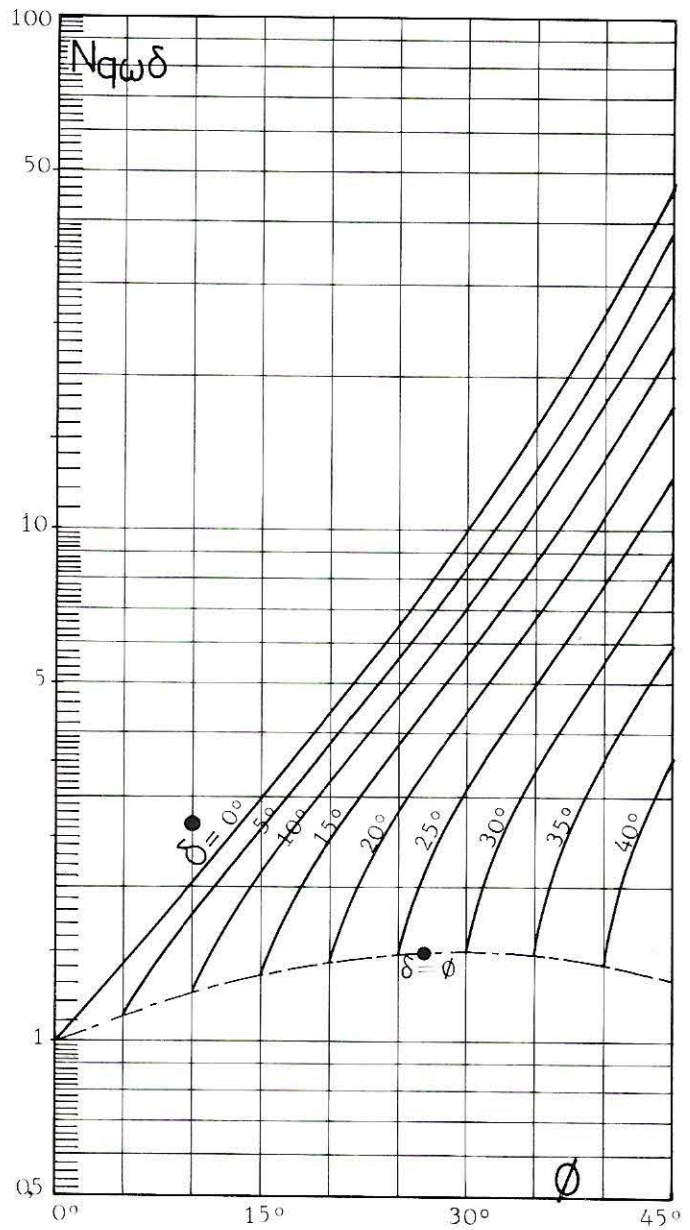
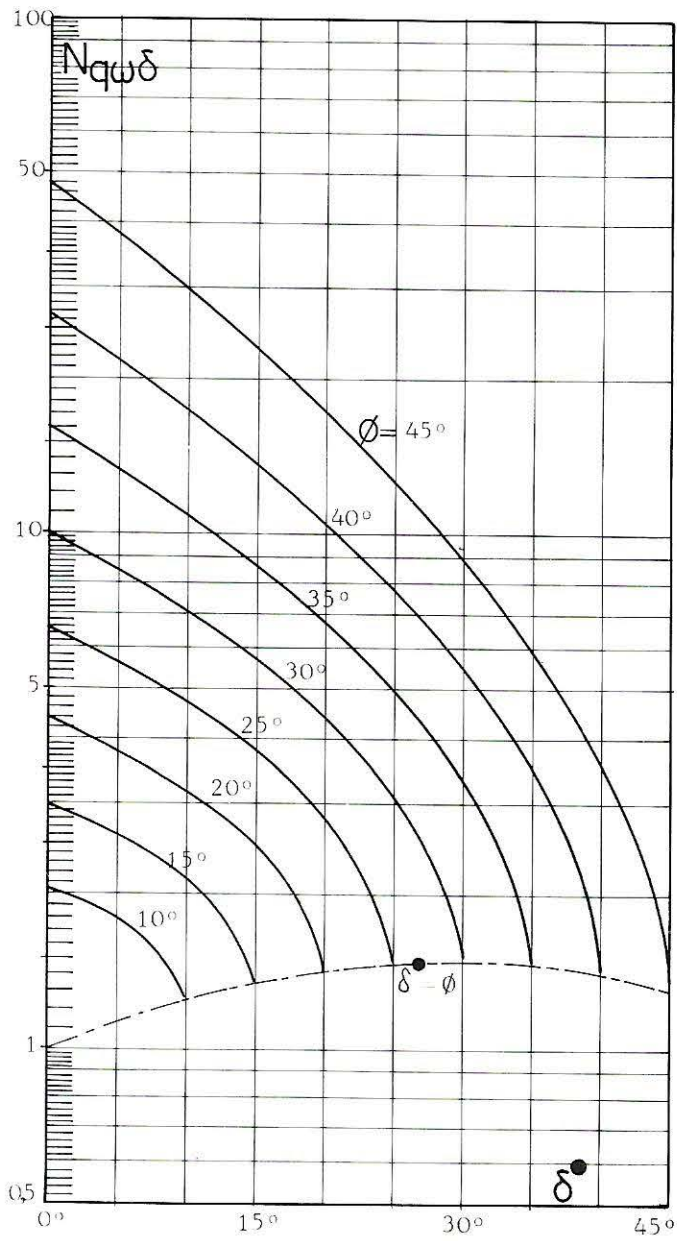
$N_{q\omega\delta}$

$$\omega = 30^\circ$$

$\frac{\delta}{\phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.43	2.05	2.97	4.37	6.54	10.05	15.99	26.66	47.32	91.59
0.1	1.41	2.01	2.87	4.14	6.08	9.14	14.14	22.80	38.85	71.42
0.2	1.40	1.96	2.76	3.91	5.62	8.24	12.38	19.25	31.40	54.67
0.3	1.38	1.91	2.64	3.67	5.16	7.35	10.70	16.02	24.94	41.02
0.4	1.36	1.85	2.51	3.42	4.69	6.49	9.13	13.12	19.44	30.09
0.5	1.34	1.79	2.38	3.17	4.22	5.66	7.66	10.54	14.82	21.51
0.6	1.32	1.72	2.24	2.90	3.75	4.86	6.32	8.28	11.00	14.91
0.7	1.29	1.65	2.09	2.63	3.28	4.09	5.08	6.32	7.89	9.93
0.8	1.26	1.57	1.92	2.34	2.81	3.34	3.94	4.62	5.39	6.24
0.9	1.22	1.46	1.73	2.01	2.30	2.59	2.88	3.14	3.37	3.54
1	1.12	1.24	1.35	1.43	1.48	1.50	1.48	1.41	1.31	1.17

$$N q \omega \delta$$

$$\omega = 30^\circ$$

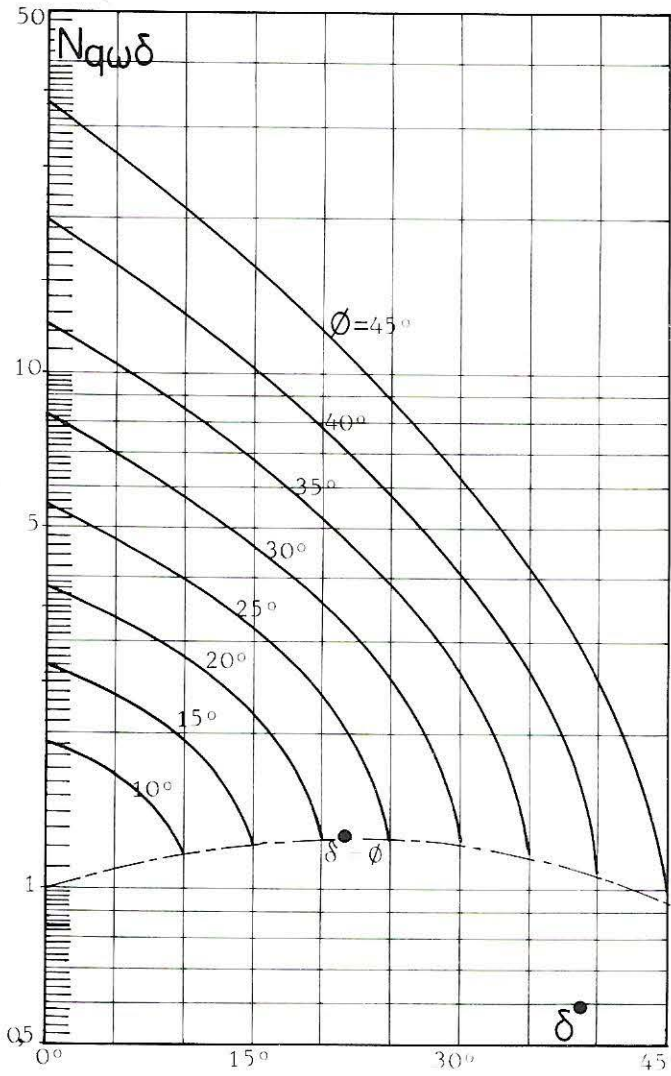


8-4

$N_{q\omega\delta}$

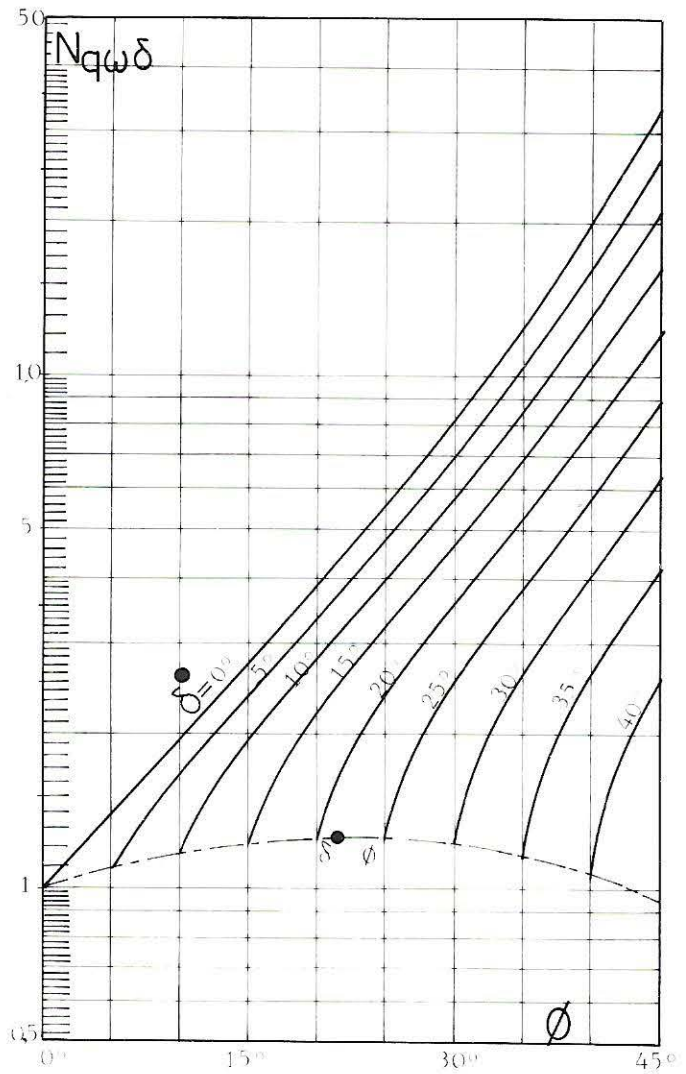
$$\omega = 40^\circ$$

$\frac{\delta^\circ}{\Phi}$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	1.38	1.93	2.71	3.84	5.56	8.21	12.52	19.89	33.38	60.42
0.1	1.37	1.89	2.61	3.65	5.17	7.47	11.08	17.01	27.40	47.11
0.2	1.35	1.84	2.51	3.44	4.78	6.73	9.69	14.36	22.15	36.06
0.3	1.34	1.79	2.40	3.23	4.38	6.01	8.38	11.95	17.59	27.06
0.4	1.32	1.74	2.29	3.01	3.99	5.31	7.15	9.78	13.71	19.85
0.5	1.30	1.68	2.17	2.79	3.59	4.63	6.00	7.86	10.45	14.19
0.6	1.28	1.62	2.04	2.56	3.19	3.97	4.95	6.18	7.76	9.83
0.7	1.25	1.55	1.90	2.31	2.79	3.34	3.98	4.71	5.56	6.55
0.8	1.22	1.47	1.75	2.06	2.38	2.73	3.09	3.45	3.80	4.11
0.9	1.18	1.37	1.57	1.77	1.95	2.12	2.25	2.34	2.38	2.34
1	1.09	1.17	1.22	1.25	1.25	1.22	1.16	1.06	0.94	0.79



$$Nq\omega\delta$$

$$\omega = 40^\circ$$



8-4

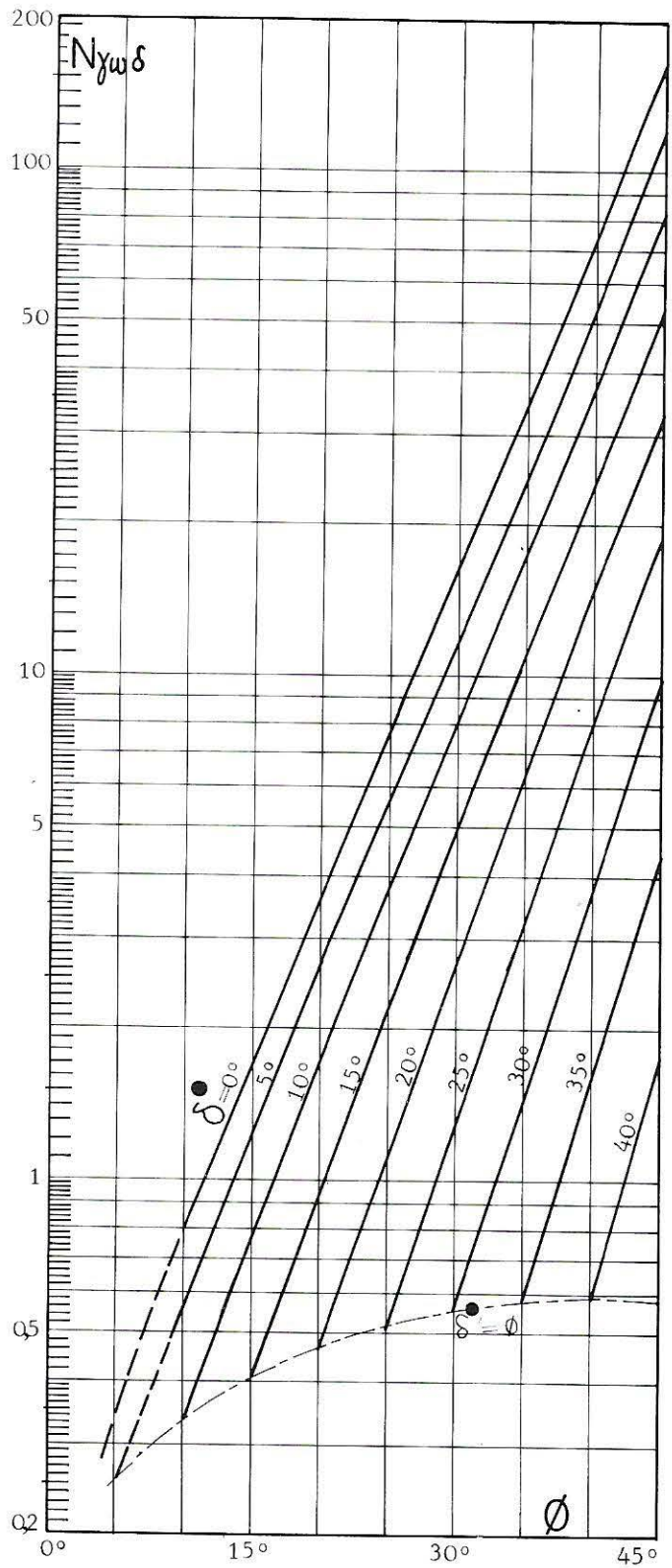
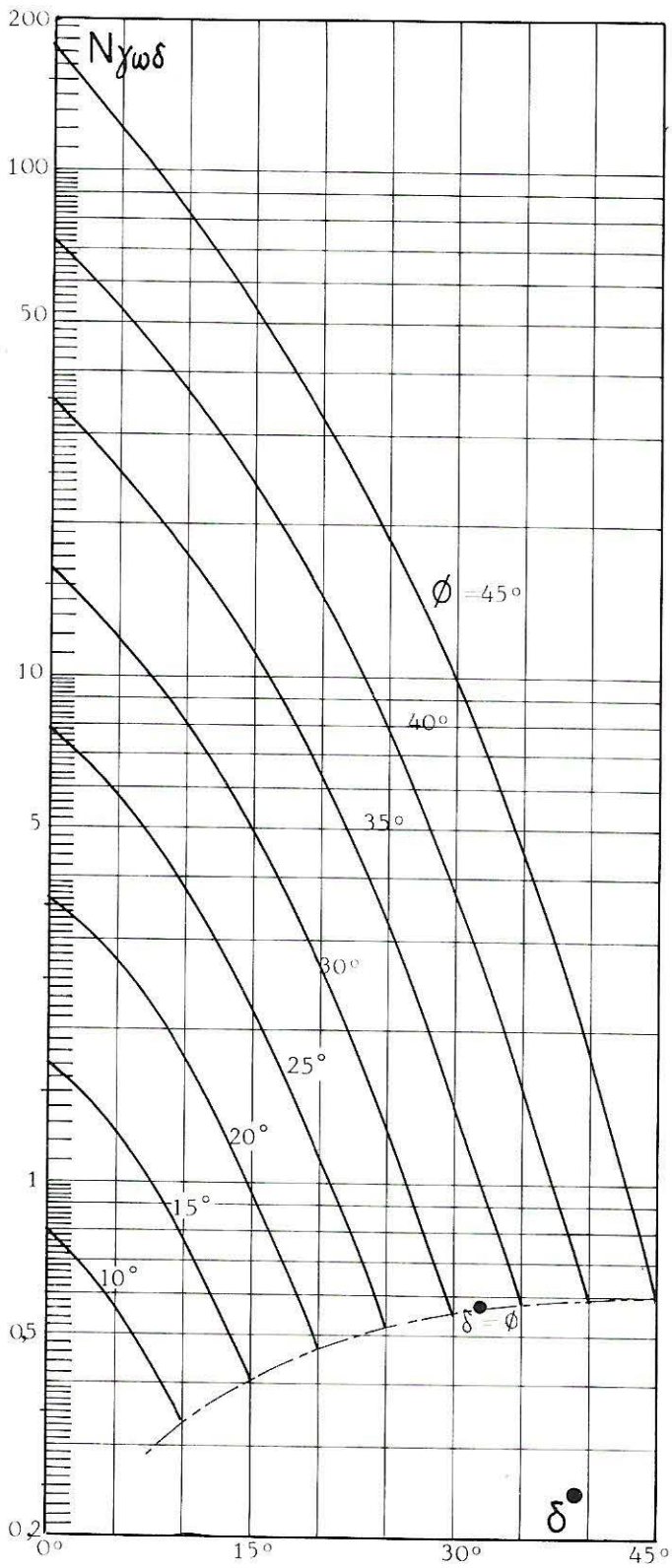
N $\gamma\omega\delta$

$$\omega = 10^\circ$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.80	1.70	3.60	0.78	16.3	35.0	73.0	173	0
0.56	1.25	2.78	5.70	11.9	25.4	52.9	123	5°
0.34	0.77	1.77	3.75	8.12	17.8	36.7	82.6	10°
	0.41	0.95	2.20	5.04	11.1	23.6	53.0	15°
		0.47	1.11	2.65	6.30	14.3	32.8	20°
			0.52	1.30	3.20	7.90	18.6	25°
				0.56	1.43	3.66	9.80	30°
					0.58	1.58	4.40	35°
						0.59	1.76	40°
							0.58	45°

$N_{\gamma\omega\delta}$

$$\omega = 10^\circ$$



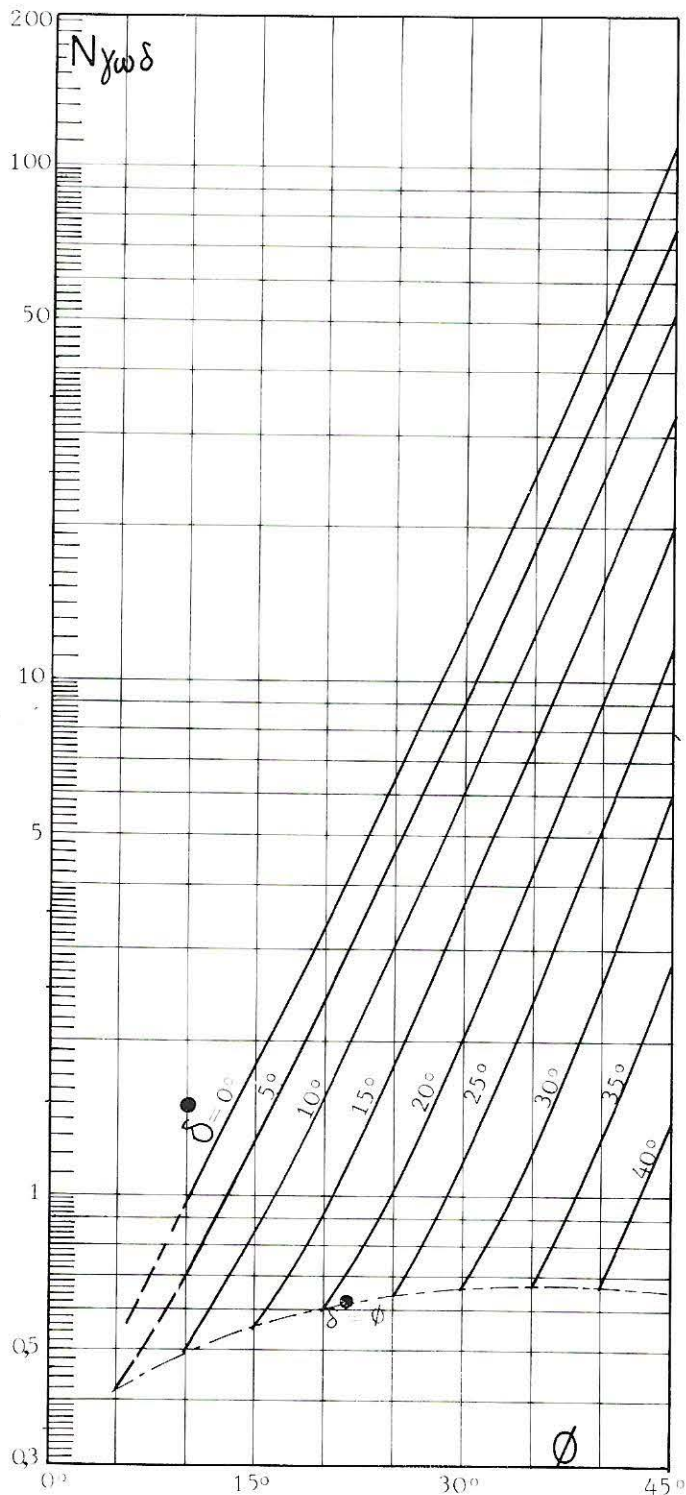
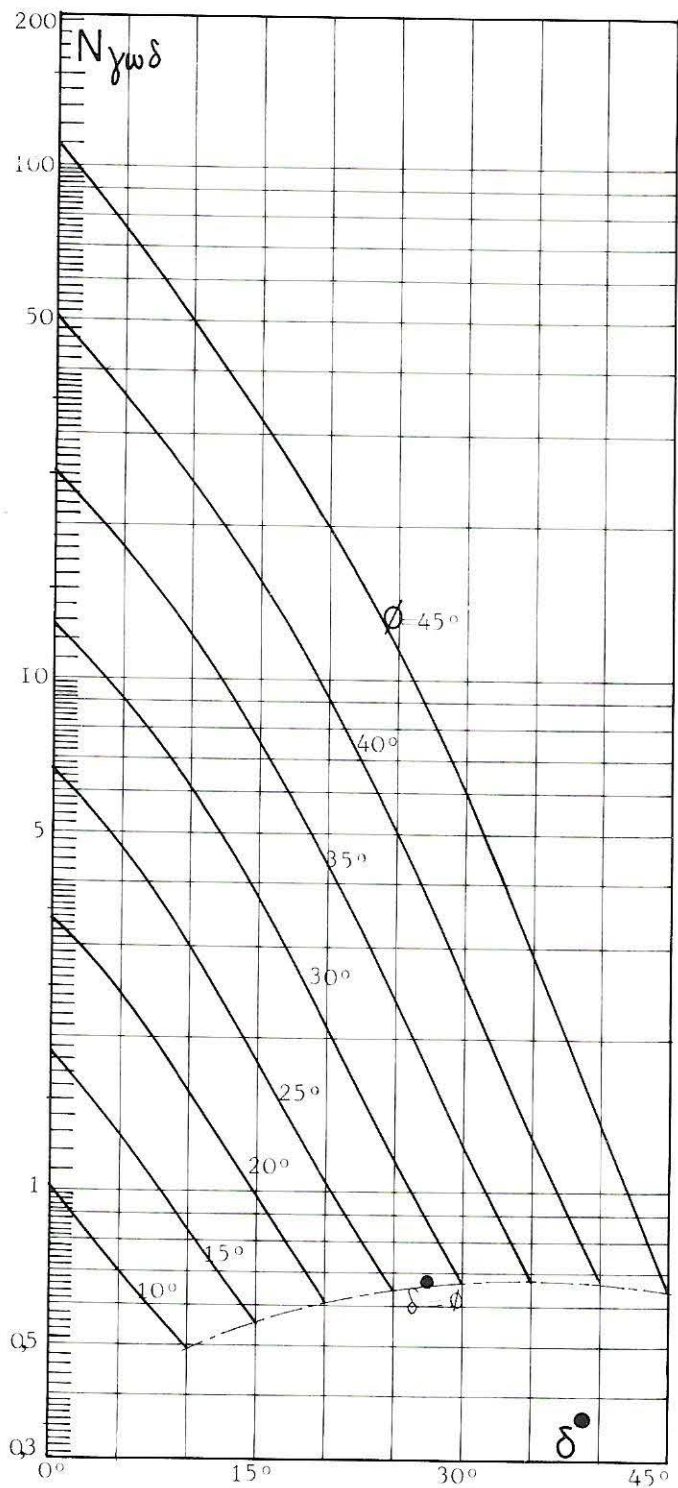
N $\gamma\omega\delta$

$$\omega = 20^\circ$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
1.00	1.86	3.40	6.65	12.8	25.0	50.6	111	0°
0.70	1.30	2.50	4.66	9.20	18.0	36.0	76.0	5°
0.49	0.84	1.57	3.00	6.16	12.5	24.5	51.2	10°
	0.55	0.98	1.80	3.72	7.50	15.7	32.8	15°
		0.61	1.02	2.02	4.30	9.30	20.0	20°
			0.64	1.19	2.35	5.30	11.8	25°
				0.66	1.23	2.60	6.00	30°
					0.67	1.30	2.82	35°
						0.67	1.40	40°
							0.64	45°

N_{γωδ}

$$\omega = 20^\circ$$

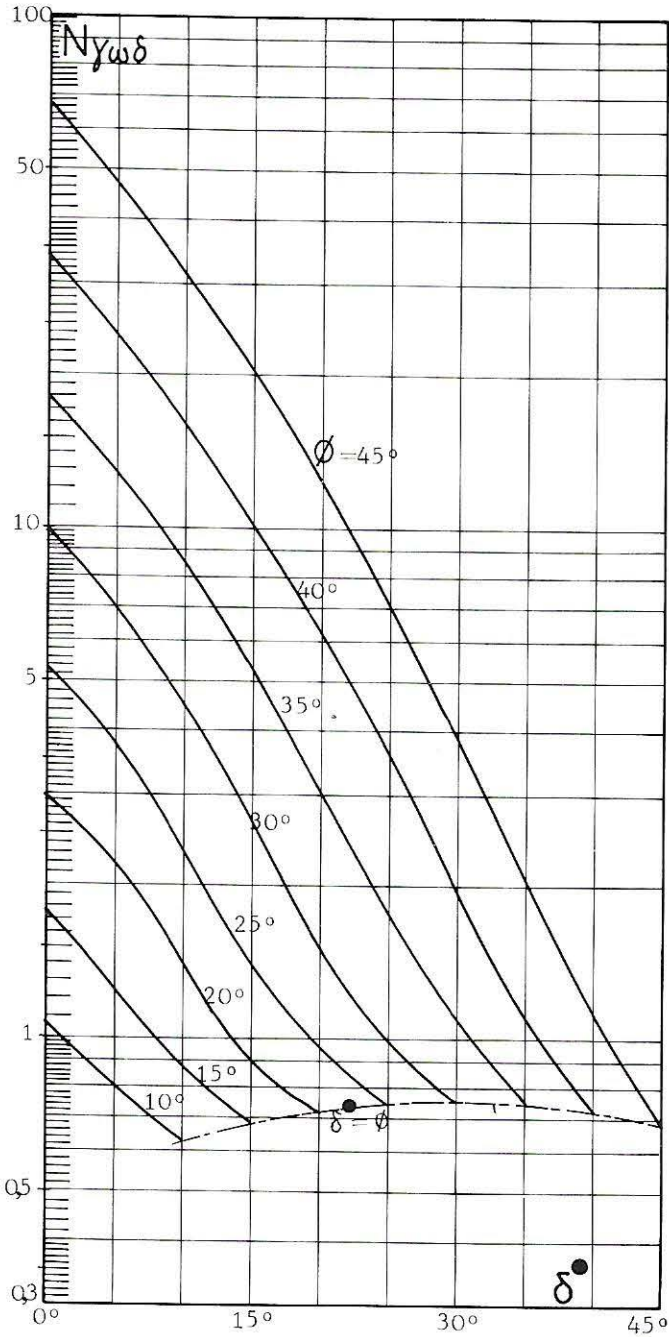


8-4

$$N_{\gamma\omega\delta}$$

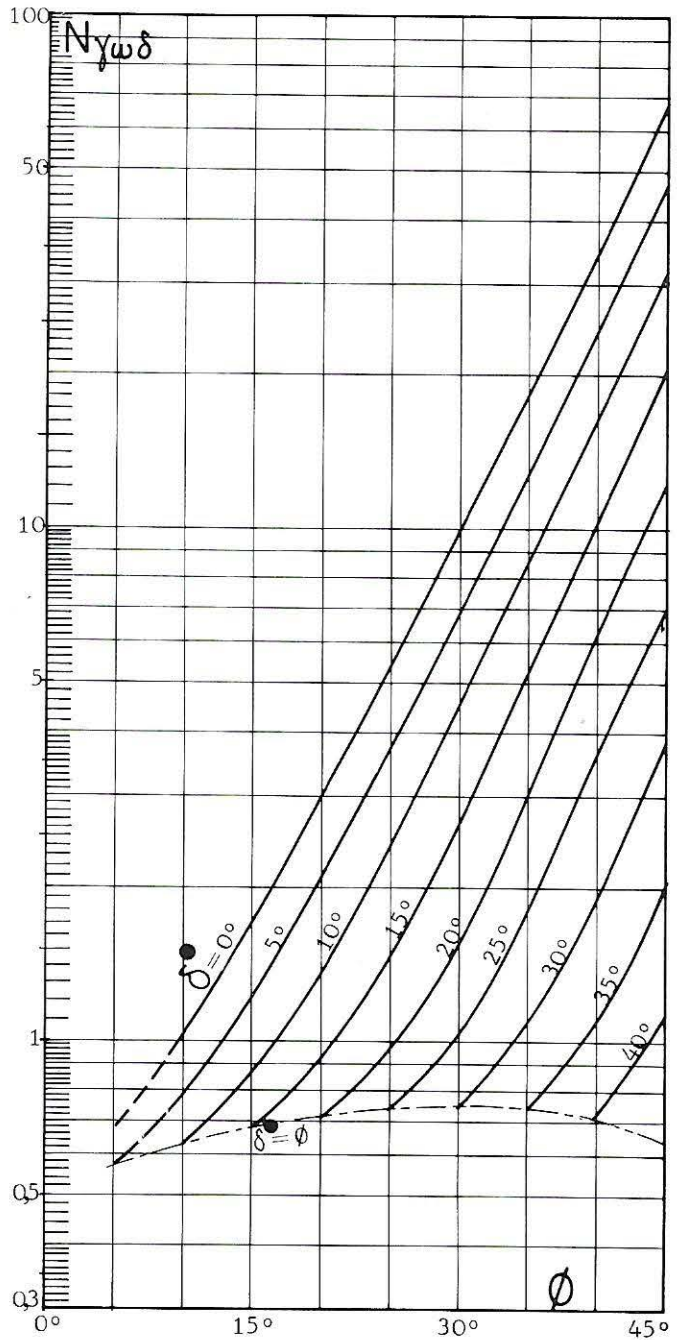
$$\omega = 30^\circ$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
1.04	1.78	2.95	5.30	9.82	18.2	34.0	68.0	0°
0.80	1.25	2.20	3.75	6.92	12.8	23.9	46.8	5°
0.63	0.87	1.40	2.37	4.50	8.60	16.1	31.8	10°
	0.68	0.89	1.48	2.60	5.20	10.1	20.6	15°
		0.72	0.97	1.53	3.00	6.20	12.4	20°
			0.74	0.97	1.80	3.64	7.00	25°
				0.75	1.10	1.94	3.82	30°
					0.74	1.10	2.03	35°
						0.72	1.13	40°
							0.68	45°



N
 $\gamma\omega\delta$

$\omega = 30^\circ$

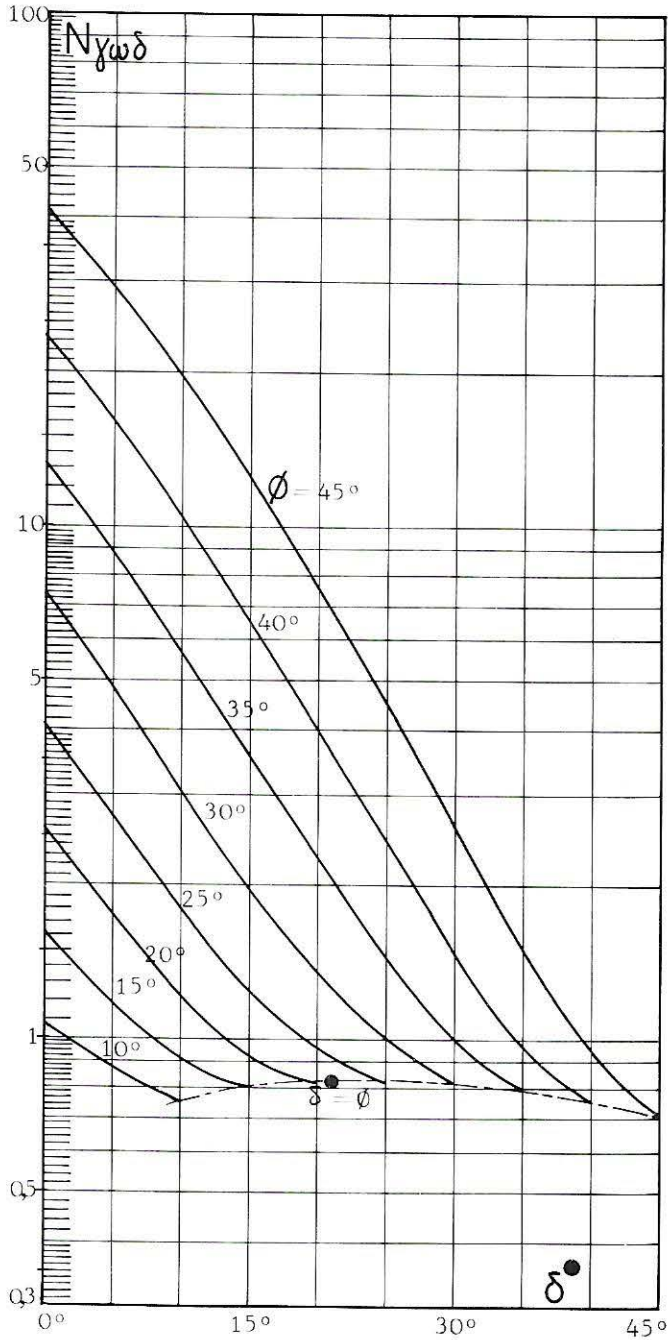


8-4

N $\gamma\omega\delta$

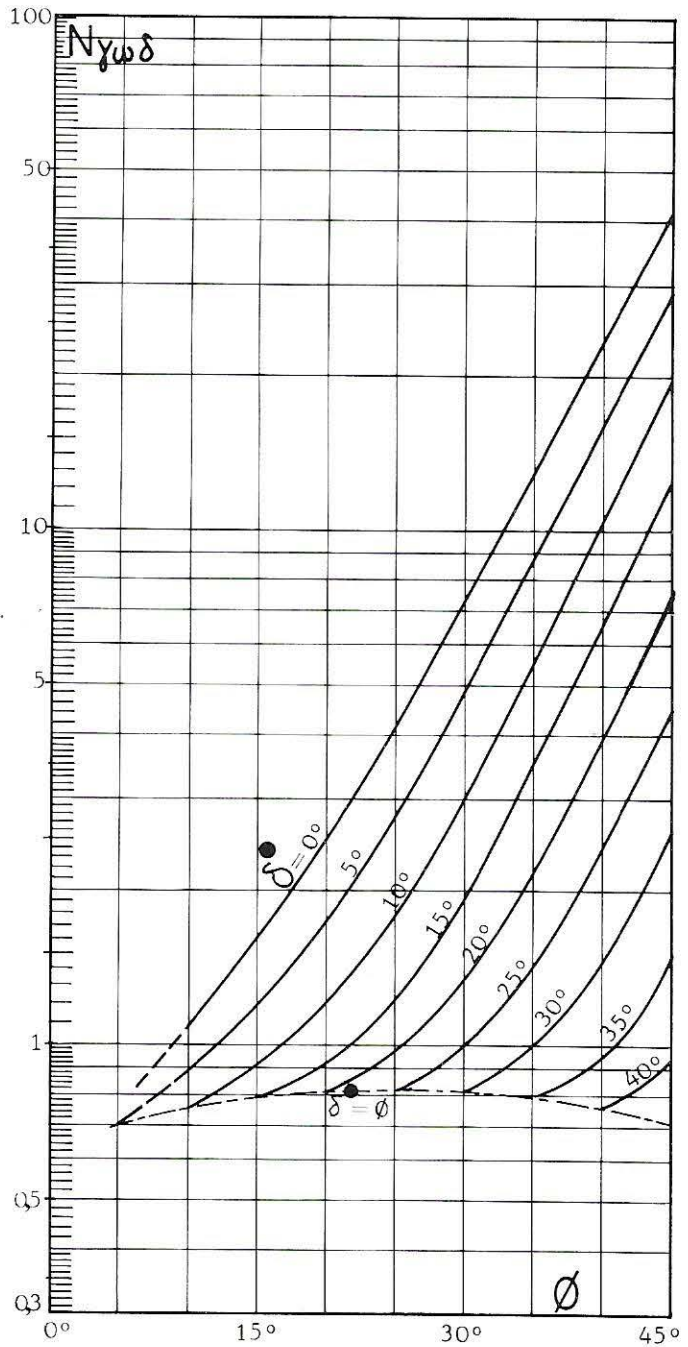
$$\omega = 40^\circ$$

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
1.08	1.62	2.53	4.20	7.40	13.2	23.3	41.2	0°
0.88	1.20	1.76	2.73	4.90	8.80	16.0	29.2	5°
0.76	1.91	1.23	1.80	3.00	5.60	10.3	19.4	10°
	0.79	0.91	1.23	1.96	3.54	6.40	12.4	15°
		0.82	0.96	1.36	2.22	3.96	7.60	20°
			0.82	0.99	1.46	2.44	4.50	25°
				0.81	0.99	1.46	2.60	30°
					0.79	0.94	1.50	35°
						0.76	0.94	40°
							0.70	45°



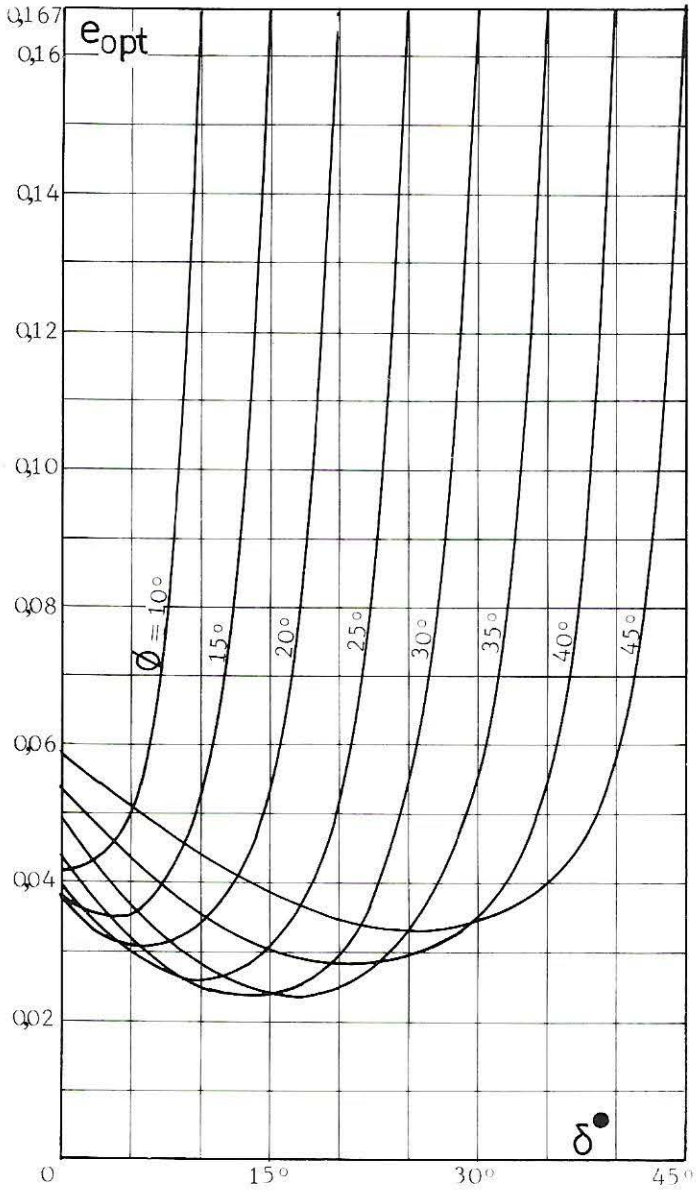
N _{$\gamma\omega\delta$}

$\omega = 40^\circ$

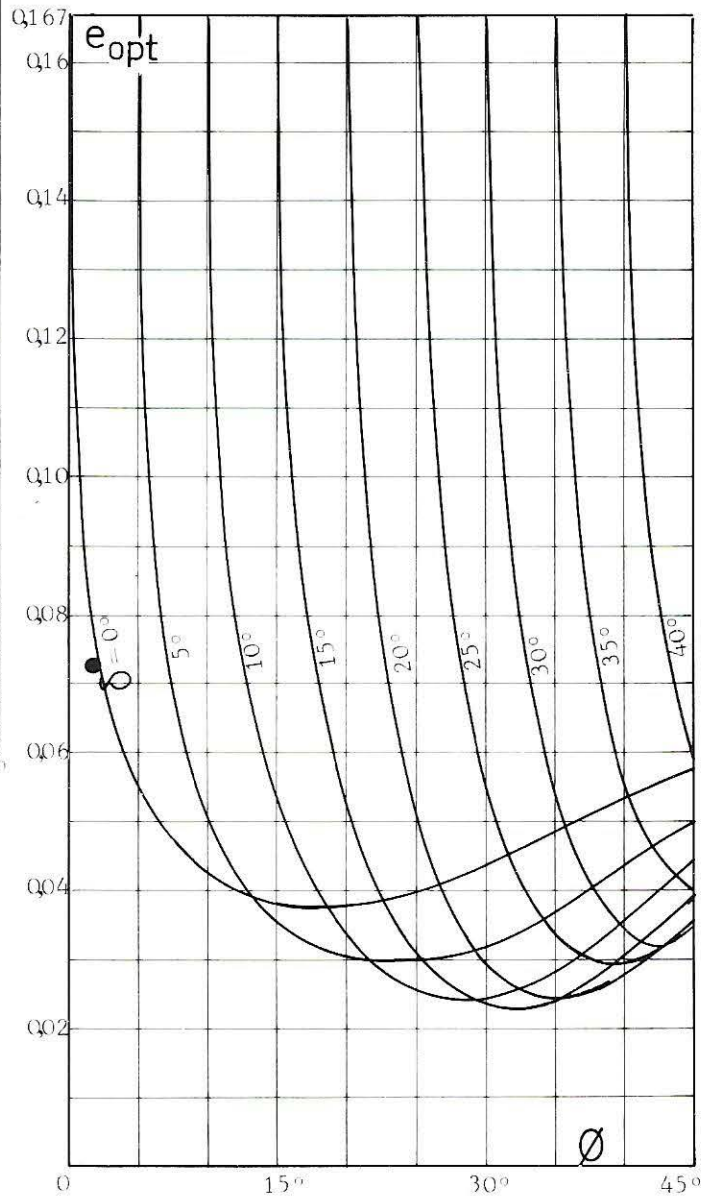


e_{opt}

10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	Φ δ°
0.042	0.038	0.037	0.038	0.044	0.049	0.053	0.058	0°
0.050	0.035	0.031	0.030	0.032	0.037	0.044	0.051	5°
0.167	0.052	0.034	0.025	0.025	0.028	0.035	0.044	10°
	0.167	0.054	0.031	0.024	0.024	0.030	0.039	15°
		0.167	0.050	0.029	0.024	0.028	0.035	20°
			0.167	0.056	0.033	0.029	0.033	25°
				0.167	0.056	0.025	0.034	30°
					0.167	0.056	0.040	35°
						0.167	0.058	40°
							0.167	45°



e_{opt}



8-4

$$N_c \gamma \omega \delta$$

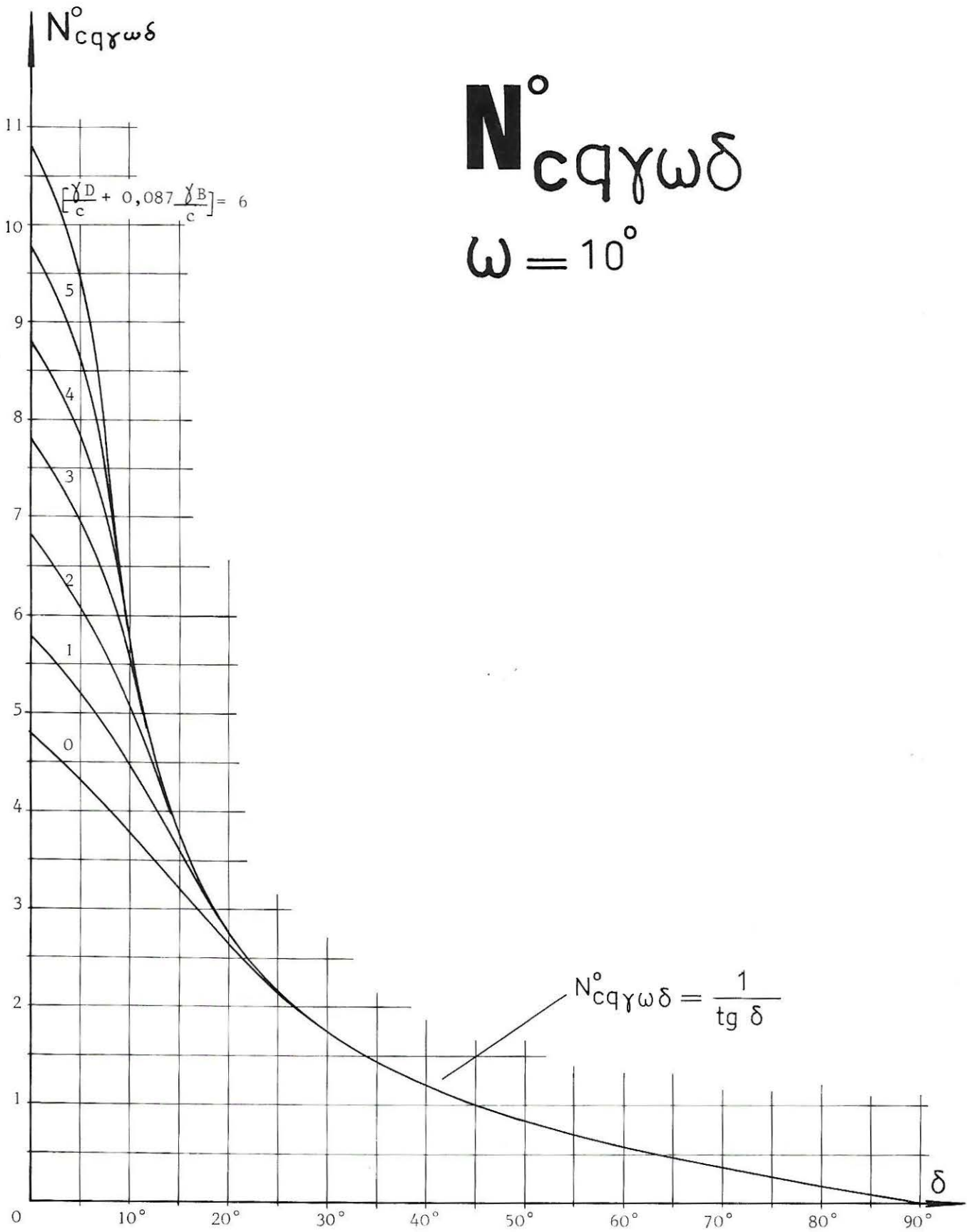
	δ									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0	4.79	4.32	3.80	3.23	2.67	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
1	5.79	5.20	4.48	3.64	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
2	6.79	6.07	5.10	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
3	7.79	6.93	5.58	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
4	8.79	7.77	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
5	9.79	8.59	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
6	10.79	9.39	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00

$$\gamma_D + \frac{1}{2} \frac{\gamma_B}{C} \sin \omega$$

$$\omega = 10^\circ$$

$$N^{\circ}_{c q \gamma \omega \delta}$$

$$\omega = 10^{\circ}$$



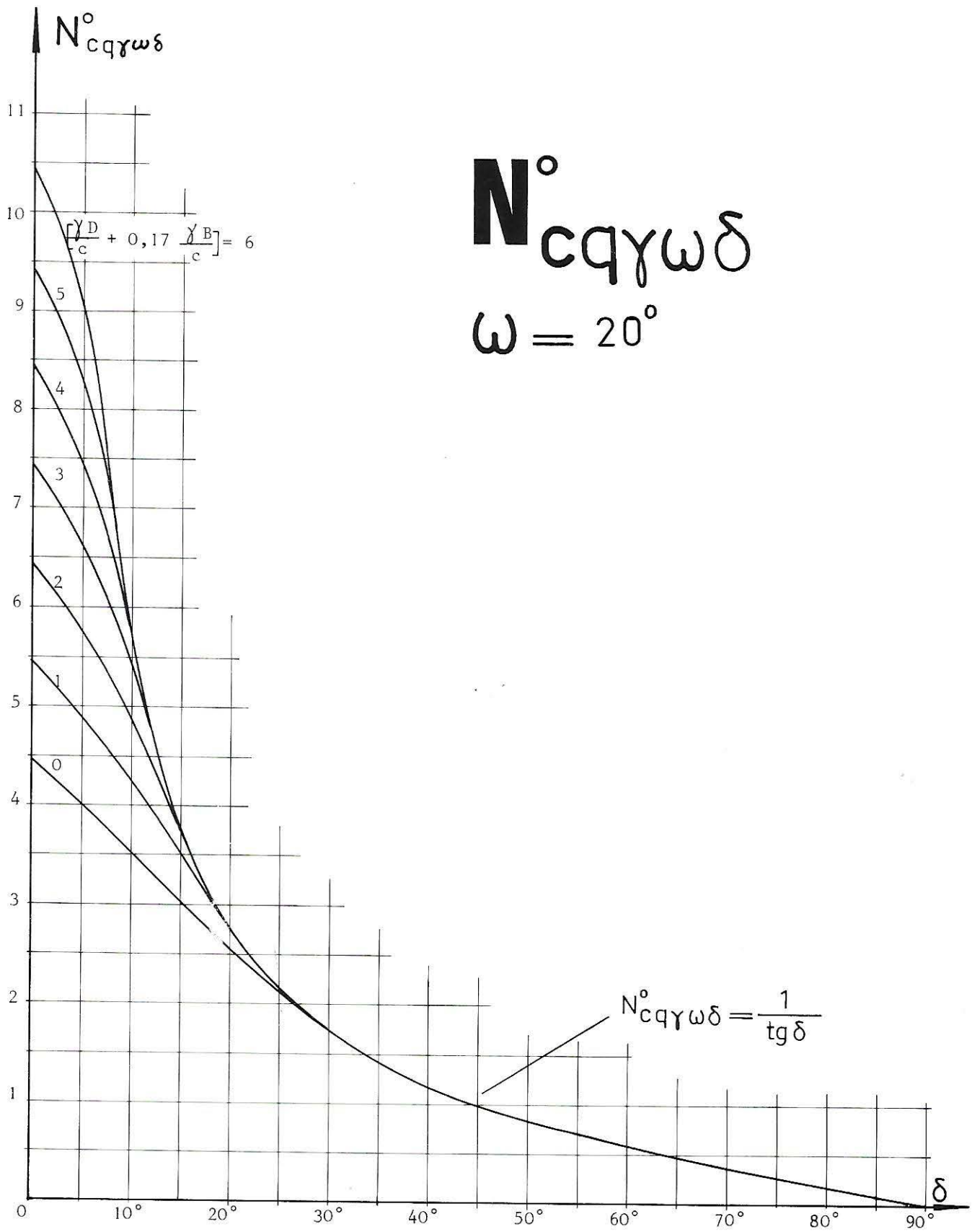
8-4

$$N_{cq}^{\circ} \gamma \omega \delta$$

	δ									
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0	4.44	4.02	3.54	3.05	2.57	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
1	5.44	4.90	4.25	3.52	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
2	6.44	5.77	4.90	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
3	7.44	6.63	5.44	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
4	8.44	7.48	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
5	9.44	8.31	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
6	10.44	9.12	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00

$$\frac{\gamma D}{C} + \frac{1}{2} \frac{\gamma B}{C} \sin \omega$$

$$\omega = 20^{\circ}$$

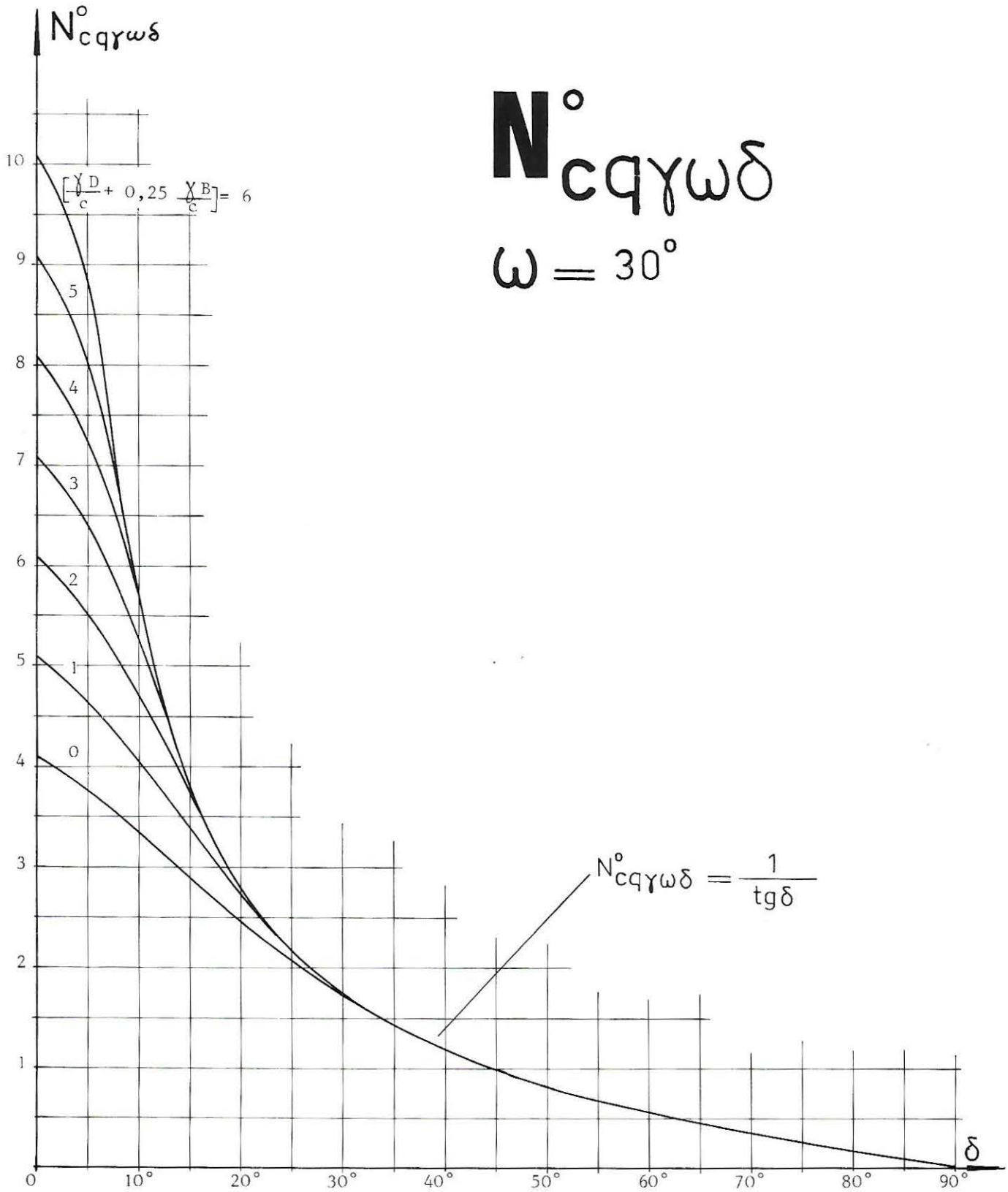


8-4

$$N_{c\gamma\omega\delta}^{\circ}$$

	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
0	4.09	3.70	3.29	2.86	2.44	2.06	1.73	1.42	1.19	1.00
1	5.09	4.59	4.01	3.38	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
2	6.09	5.47	4.68	3.72	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
3	7.09	6.33	5.27	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
4	8.09	7.19	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
5	9.09	8.02	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00
6	10.09	8.84	5.67	3.73	2.74	2.14	1.73	1.42	1.19	1.00

$$\omega = 30^{\circ}$$



EXPRESSION DES COEFFICIENTS

$N_{\gamma\omega\delta}$ n'a pas d'expression analytique

$$N_{c\omega\delta} = (N_{q\omega\delta} - 1) \cotg \phi$$

$$N_{q\omega\delta} = \frac{(\cos \delta^\bullet + \sin \phi \cos \Gamma) \cos \delta}{1 - \sin \phi} \exp [(\pi - 2\omega - \delta^\bullet - \Gamma) \operatorname{tg} \phi]$$

$$\text{si } \omega \leq \pi/2 - (\Gamma + \delta^\bullet)/2$$

$$N_{q\omega\delta} = \frac{(\cos \delta^\bullet + \sin \phi \cos \Gamma)}{1 - \sin \phi} \frac{\cos n - \sin \phi \cos m}{\cos n + \sin \phi \cos m} \cos \delta^\bullet$$

$$\text{si } \frac{\pi}{2} - \frac{\Gamma + \delta^\bullet}{2} \leq \omega < \pi - \frac{\Gamma + \delta^\bullet}{2}$$

avec :

$$\sin \Gamma = \sin \delta^\bullet / \sin \phi$$

$$m = -\pi + \omega + \frac{\Gamma + \delta^\bullet}{2}$$

$$\sin n = -\sin \phi \sin \left(\omega + \frac{\Gamma + \delta^\bullet}{2} \right)$$

Cas particuliers :

1 - Si $\omega = 0$

$$N_{q\delta} = \frac{(\cos \delta^\bullet + \sin \phi \cos \Gamma) \cos \delta^\bullet}{1 - \sin \phi} \exp [(\pi - \delta^\bullet - \Gamma) \operatorname{tg} \phi]$$

2 - Si $\delta = 0$

$$N_{q\omega} = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \exp [(\pi - 2\omega) \operatorname{tg} \phi]$$

3 - Si $\delta^\bullet = \phi$

$$N_{q\omega\delta} = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \cos \phi \exp \left[\left(\frac{\pi}{2} - 2\omega - \phi \right) \operatorname{tg} \phi \right]$$

$$\text{pour } \omega \leq \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

$$N_{q\omega\delta} = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \cos \phi \frac{\cos n - \sin \phi \cos m}{\cos n + \sin \phi \cos m}$$

$$\text{pour } \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \leq \omega < \frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

avec :

$$m = \pi - \frac{3\pi}{4} + \omega + \frac{\phi}{2}$$

$$\sin n = -\sin \phi \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \omega \right)$$

4 - Si $\phi = 0$

$$a) N_{cq\gamma\omega\delta}^0 = X \quad \text{si } X \leq \cotg \delta$$

avec :

$$X + \text{Arc sin } (X \text{ tg } \delta) - \sqrt{1 - X^2 \text{ tg}^2 \delta} = \pi + 1 - 2\omega + \frac{\gamma D}{c} + \frac{1}{2} \gamma B \sin \omega$$

$$b) N_{cq\gamma\omega\delta}^0 = \cotg \delta \quad \text{si } X > \cotg \delta.$$

BIBLIOGRAPHIE

L'étude théorique de cette section ainsi que les résultats numériques se trouvent dans la thèse de Trân-Vô-Nhiêm [1].

REFERENCE

- [1] TRÂN-VÔ-NHIÊM, "Force portante limite des fondations superficielles et résistance maximale à l'arrachement des ancrages", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble (Février 1971), 166-191.

INDEX (*)

adhérence (entre deux couches).....	Vol. I	(Introduction § 3)
admissible (pression).....	Vol. III	(Introduction § 1.d)
angle de frottement interne.....	Vol. I	(Introduction § 3 ; Sections 1-4, 1-5)
anisotrope (sol).....	Vol. I	(Introduction § 3)
	Vol. III	(Section 7-3)
annulaire (fondation).....	Vol. I	(Section 3-10)
approximation (grandeur de l').....	Vol. I	(Deuxième page du chap. 2)
	Vol. II	(Deuxième page du chap. 6)
Archimède (poussée d').....	Vol. III	(Introduction § 3)
argile.....	Vol. I	(Section 1-5)
assise rigide.....		Voir substratum
axes (systèmes d').....	Vol. I	(Section 1-2)
base (profondeur de la).....	Vol. III	(Introduction § 1.a)
base oblique.....	Vol. III	(Sections 7-9, 8-4)
bande infinie.....	Vol. II	(Chap. 6)
bibliographie.....	Vol. I	(Introduction § 10)
bicouche.....	Vol. I	(Sections 2-3, 3-3)
	Vol. II	(Sections 6-3, 6-6)
	Vol. III	(Section 7-5)
calcul direct du tassement.....	Vol. I	(Introduction § 5)
calcul indirect du tassement.....	Vol. I	(Introduction § 5)
capillarité.....	Vol. III	(Introduction § 3)
caractéristiques du sol.....	Vol. I	(Section 1-5)
cartésiennes (coordonnées).....	Vol. I	(Section 1-2)
charge.....	Vol. I	(Introduction § 1)
charge excentrée.....	Vol. I	(Section 3-7)
	Vol. II	(Sections 4-1 et 4-2)
	Vol. III	(Chap. 8)

(*) Cet index, comme celui des deux volumes précédents, couvre l'ensemble des "Tables pour le Calcul des Fondations". Il est toutefois légèrement plus complet.

charge inclinée.....	Vol. I	(Section 2-1)
	Vol. II	(Sections 4-1 et 4-4)
	Vol. III	(Chap. 8)
charge limite.....	Vol. III	(Introduction § 1.b)
charge linéairement répartie.....	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2, 6-4)
charge normale uniforme.....	Vol. I	(Sections 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 3-5)
	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2, 4-3)
cheminée.....	Vol. I	(Section 3-10)
circulaire.....	Vol. I	(Chap. 3)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
coefficient de POISSON.....	Vol. I	(Introduction § 3 ; Section 1-5)
coefficient de réduction.....	Vol. III	(Section 8-1)
coefficient de sécurité.....	Vol. III	(Introduction § 1.d)
cohésion.....	Vol. I	(Introduction § 3 ; Section 1-5)
cohésion normale.....	Vol. III	(Introduction § 1.e)
compatibilité (relations de).....	Vol. I	(Section 1-2)
compressibilité.....	Vol. I	(Section 1-3)
concentrée (charge, force).....	Vol. I	(Chap. 2)
conique (remblai).....	Vol. I	(Section 3-9)
contraintes.....	Vol. I	(Section 1-2)
conventions de signe.....	Vol. I	(Section 1-2)
conversion d'unités.....	Vol. I	(Section 1-1)
coordonnées.....	Vol. I	(Section 1-2)
COULOMB (loi de).....	Vol. I	(Section 1-4)
cylindriques (coordonnées).....	Vol. I	(Section 1-2)
damier.....	Vol. II	(Sections 6-12 et 6-13)
déformation.....	Vol. I	(Section 1-2)
déformation plane.....	Vol. II	(Deuxième page du Chap. 6)
déplacement.....	Vol. I	(Section 1-2)
deux couches.....	Vol. I	(Sections 2-3 et 3-3)
	Vol. II	(Sections 6-3 et 6-6)
	Vol. III	(Section 7-5)
deux dimensions.....	Vol. II	(Deuxième page du chap. 6)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
déviatoire (module).....	Vol. I	(Section 1-3)
direct (calcul).....	Vol. I	(Introduction § 5)
distorsion.....	Vol. I	(Section 1-2)
distorsion (module de).....	Vol. I	(Section 1-3)
distribution linéaire.....	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2, 6-4)
distribution parabolique.....	Vol. I	(Section 3-9)
	Vol. II	(Section 6-10)

distribution trapézoïdale.....	Vol. II	(Sections 6-10 et 6-11)
distribution triangulaire.....	Vol. II	(Sections 6-10 et 6-11)
drainage (avant drainage, après drainage)..	Vol. I	(Introduction § 3 ; Section 1-5)
	Vol. III	(Introduction § 3)
drainé (non drainé).....	Vol. I	(Section 1-5)
	Vol. III	(Introduction § 3)
élasticité.....	Vol. I	(Introduction § 5 ; Section 1-3)
épaisseur finie (couche d').....	Vol. I	(Sections 2-2, 3-2 et 3-8)
	Vol. II	(Sections 4-3, 4-4, 5-2, 6-2, 6-5, 6-9, 6-11 et 6-13)
	Vol. III	(Section 7-4)
équilibre indéfini (équations de l').....	Vol. I	(Section 1-2)
excentrée (charge).....	Vol. I	(Section 3-7)
	Vol. II	(Sections 4-1 et 4-2)
	Vol. III	(Chap. 8)
excentricité de la charge.....	Vol. III	(Chap. 8)
excentricité optimale.....	Vol. III	(Chap. 8)
fictive (inclinaison).....	Vol. III	(Introduction § 1.e)
force concentrée.....	Vol. I	(Chap. 2)
force par unité de longueur.....	Vol. I	(Section 2-4)
force portante.....	Vol. I	(Introduction § 4)
	Vol. III	(Introduction § 1.b)
	Vol. III	(Chap. 7 et 8)
frottement interne.....	Vol. I	(Introduction § 3 ; Section 1-5)
géométrie des fondations.....	Vol. I	(Introduction § 1)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
glissement (entre deux couches).....	Vol. III	(Section 7-4)
glissement (surface de).....	Vol. I	(Introduction § 4)
grande longueur (fondation de).....	Vol. II	(Chap. 6)
gravier.....	Vol. I	(Section 1-5)
grille.....	Vol. II	(Chap. 5)
hauteur (de remblai).....	Vol. I	(Section 3-9)
	Vol. II	(Sections 4-6, 6-10 et 6-11)
hétérogène (sol).....	Vol. I	(Introduction § 3)
homogène (sol).....	Vol. I	(Introduction § 3)
HOOKE (loi de).....	Vol. I	(Section 1-3)
inclinaison fictive.....	Vol. III	(Introduction § 1.e)
inclinaison réelle.....	Vol. III	(Introduction § 1.e)
incliné (sol).....	Vol. III	(Sections 7-8 et 8-3)
inclivée (base de la fondation).....	Vol. III	(Sections 7-9 et 8-4)

incliné (charge).....	Vol. I	(Section 2-1)
	Vol. II	(Sections 4-1 et 4-4)
	Vol. III	(Chap. 8)
incompressible.....	Vol. I	(Section 1-2)
indirect (calcul).....	Vol. I	(Introduction § 5)
infinie (bande).....	Vol. II	(Chap. 6)
infinie (fondation de longueur).....	Vol. II	(Chap. 6)
instantané (tassement).....	Vol. I	(Introduction § 2 et 5)
isotrope (sol).....	Vol. I	(Introduction § 3)
LAME (coefficients de).....	Vol. I	(Section 1-3)
LAME (équation de NAVIER).....	Vol. I	(Section 1-3)
largeur des fondations.....	Vol. I	(Introduction § 1)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
ligne de longueur finie.....	Vol. I	(Section 2-4)
limite (pression).....	Vol. I	(Introduction § 4)
	Vol. III	(Introduction § 1.c)
linéairement répartie (contrainte).....	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2 et 6-4)
longueur des fondations.....	Vol. I	(Introduction § 1)
	Vol. II	(Deuxième page du Chap. 6)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
longueur (grande).....	Vol. II	(Chap. 6)
masse volumique.....	Vol. I	(Section 1-5)
milieu semi-infini.....	Vol. I	(Sections 2-1, 2-4, 3-1, 3-6, 3-7, 3-9 et 3-10)
	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2, 4-5, 4-6, 5-1, 6-1, 6-4, 6-8, 6-10 et 6-12)
	Vol. III	(Sections 7-1, 7-9, 8-1 et 8-4)
module d'YOUNG.....	Vol. I	(Introduction § 3 ; Sections 1-3 et 1-5)
module fonction de la profondeur.....	Vol. I	(Section 3-5)
	Vol. II	(Section 6-7)
	Vol. III	(Section 7-6)
moment.....	Vol. I	(Section 3-7)
	Vol. II	(Sections 4-1, 6-4, 6-8 et 6-9)
	Vol. III	(Chapitre 8)
monocouche (sol).....	Vol. I	(Sections 2-2, 3-2 et 3-8)
	Vol. II	(Sections 4-3 et 4-4)
	Vol. III	(Section 7-4)

mur de soutènement (fondation de).....	Vol. II	(Sections 4-1, 6-4 et 6-8)
	Vol. III	(Chapitre 8)
nappe phréatique.....	Vol. III	(Section 7-7)
NAVIER-LAME (équations de).....	Vol. I	(Section 1-3)
normale (charge).....	Vol. I	(Chapitres 2, 3, 4, 5, 6 et 7 : toutes les sections).
notations.....	Vol. I	(Introduction § 9)
oblique (base).....	Vol. III	(Sections 7-9 et 8-4)
orthotrope.....	Vol. III	(Section 7-3)
parabolique (charge).....	Vol. I	(Section 3-9)
	Vol. II	(Section 6-10)
paramètres mécaniques du sol.....	Vol. I	(Section 1-5)
penne.....	Vol. III	(Sections 7-8 et 8-3)
plasticité.....	Vol. I	(Introduction § 4, Section 1-4)
poids volumique du sol.....	Vol. I	(Introduction § 3, Section 1-5)
POISSON (coefficient de).....	Vol. I	(Introduction § 3, Sections 1-3 et 1-5)
ponctuellè (force, charge).....	Vol. I	(Sections 2-1, 2-2 et 2-3)
potreau.....	Vol. I	(Sections 2-1, 2-2 et 2-3)
poussée d'Archimède.....	Vol. III	(Introduction § 3)
pression.....	Vol. I	(Section 1-1)
pression admissible.....	Vol. III	(Introduction § 1.d)
pression limite.....	Vol. I	(Introduction § 4)
	Vol. III	(Introduction § 1.c)
profondes (fondations).....	Vol. I	(Introduction § 1)
profondeur (des fondations).....	Vol. I	(Introduction § 1 et § 5)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
profondeur (module fonction de).....	Vol. I	(Section 3-5)
	Vol. II	(Section 6-7)
	Vol. III	(Section 7-6)
propriétés du sol.....	Vol. I	(Introduction § 3 ; Section 1-5)
pyramidal (remblai).....	Vol. II	(Section 4-6)
quelconque (charge de forme).....	Vol. II	(Chapitre 5)
radier.....	Vol. I	(Introduction § 1)
rectangulaire (fondation).....	Vol. II	(Chapitre 4)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)

remblai.....	Vol. I	(Section 3-9)
	Vol. II	(Sections 4-6, 6-10 et 6-11)
réservoir.....	Vol. I	(Sections 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 et 3-5)
résultante des charges appliquées.....	Vol. II	(Sections 4-1 et 6-4)
rigide (fondation, radier).....	Vol. I	(Sections 3-6, 3-7 et 3-8)
	Vol. II	(Sections 4-5, 6-8 et 6-9)
	Vol. III	(Avant-Propos)
rigide (substratum).....	Vol. I	(Sections 2-2, 3-2 et 3-8)
	Vol. II	(Sections 4-3, 5-2, 6-2, 6-5, 6-9, 6-11 et 6-13)
	Vol. III	(Section 7-4)
rotation.....	Vol. II	(Sections 4-1, 6-4, 6-8 et 6-9)
rotation moyenne.....	Vol. II	(Sections 4-1 et 6-4)
rugosité (de la base de la fondation).....	Vol. III	(Introduction § 1.a)
sable.....	Vol. I	(Section 1-5)
saturé (force portante d'un sol).....	Vol. III	(Introduction § 3)
sec (force portante d'un sol).....	Vol. III	(Introduction § 3)
sécurité (coefficient de).....	Vol. III	(Introduction § 1.d)
semelle filante.....	Vol. II	(Chapitre 6)
	Vol. III	(Chapitres 7 et 8)
semelle isolée.....	Vol. I	(Chapitres 2 et 3)
	Vol. II	(Chapitre 4)
semi-infini (milieu).....	Vol. I	(Sections 2-1, 2-4, 3-1, 3-6, 3-7, 3-9 et 3-10)
	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2, 4-5, 4-6, 5-1, 6-1, 6-4, 6-8, 6-10 et 6-12)
	Vol. III	(Sections 7-1, 7-9, 8-1 et 8-4)
signes (convention de).....	Vol. I	(Section 1-2)
silo (fondation de).....	Vol. I	(Chapitre 3)
silt.....	Vol. I	(Section 1-5)
souple (radier).....	Vol. I	(Introduction § 6)
sphériques (coordonnées).....	Vol. I	(Section 1-2)
stratifié (sol).....	Vol. III	(Section 7-2)
substratum indéformable.....	Vol. I	(Sections 2-2, 3-2 et 3-8)
	Vol. II	(Sections 4-3, 4-4, 6-2, 6-5, 6-9, 6-11 et 6-13)
	Vol. III	(Section 7-4)
superficielle (fondation).....	Vol. I	(Introduction § 1)
surcharge.....	Vol. III	(Introduction § 2.b)
systèmes de coordonnées.....	Vol. I	(Section 1-2)
tassement.....	Vol. I	(Introduction § 5)
tassement final (total).....	Vol. I	(Introduction § 2 et 5)

tassement instantané.....	Vol. I	(Introduction § 2 et 5)
tassement moyen.....	Vol. I	(Sections 3-1 et 3-2)
	Vol. II	(Sections 4-1 et 6-5)
taux de travail.....	Vol. III	(Introduction § 1.d)
tenseur contrainte.....	Vol. I	(Section 1-2)
tenseur déformation.....	Vol. I	(Section 1-2)
terme (court terme et long terme).....	Vol. III	(Introduction § 3)
terril.....	Vol. I	(Section 3-9)
trapézoïdal (remblai).....	Vol. II	(Sections 6-10 et 6-11)
triangulaire (remblai).....	Vol. II	(Sections 6-10 et 6-11)
tricouche (sol).....	Vol. I	(Section 3-4)
trois couches.....	Vol. I	(Section 3-4)
trois dimensions.....	Vol. I	(Introduction § 5)
	Vol. III	(Introduction § 1.a)
tronconique (remblai).....	Vol. I	(Section 3-9)
uniforme (pression, charge normale).....	Vol. I	(Sections 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 et 3-5)
	Vol. II	(Sections 4-1, 4-2, 4-3, 6-4, 6-5, 6-6 et 6-7)
unités.....	Vol. I	(Introduction § 8, Section 1-1)
YOUNG (module d').....	Vol. I	(Introduction § 3, Section 1-5)

Imprimé en France
Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 PARIS