

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 3 (1948)

Artikel: Rapport sur les voiles minces construits en Espagne

Autor: Torroja, E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-4122>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

IVc1

Rapport sur les voiles minces construits en Espagne

Bericht über die in Spanien ausgeführten Schalenbauten

Report on thin slabs constructed in Spain

PROF. E. TORROJA

Directeur du Laboratoire central de Ensayo de Materiales de Construcción, Madrid

Malgré les réalisations parfaitement réussies déjà conçues, on peut dire que l'avenir des constructions en voile mince reste toujours à faire et, en réalité, ce procédé est encore peu exploité.

Les difficultés que présente son calcul d'une part, et la nécessité d'établir des cintres et coffrages coûteux d'autre part, limitent assez leurs possibilités d'application.

Mais il faut espérer que la perspective changera dans peu d'années puisque pour la résolution des problèmes de ces voiles, aucune solution n'offre actuellement, du point de vue technique, de possibilités plus grandes, ni meilleures.

A part les voiles polyédriques, très intéressants, les surfaces continues (non seulement cylindriques mais de double courbure positive ou négative) présentent des avantages inestimables et des solutions adéquates à chaque problème qui se présente en pratique.

Malheureusement, les conditions de bord ne s'accomplissent en général pas dans un équilibre de voile sans flexion, et l'oubli de cette condition (hypothèse simplificatrice très attrayante) a été la cause de beaucoup plus de désastres que ceux commentés dans les publications techniques.

Le problème des voiles, en considérant la rigidité à la flexion, nécessaire pour établir l'équilibre est, en général, difficile à résoudre; on est tenté de les abandonner fréquemment, sauf pour les cas bien connus des voiles cylindriques ou de révolution et de ne pas profiter des avantages constructifs des surfaces réglées.

D'autre part, les grandes réalisations en voiles cylindriques, torales et de révolution, et leur bon comportement, constituent un indice des énormes portées qu'on peut atteindre. L'utilité du précontraint ou d'autres systèmes qui permettent l'introduction pratique des dislocations analogues à celles de Volterra ou de Somigliana, et aussi des dislocations continues dans toute la surface, ouvre un grand champ pratiquement inexploré, quoiqu'on en ait déjà réalisé des exemples de voiles précontraints dans toute

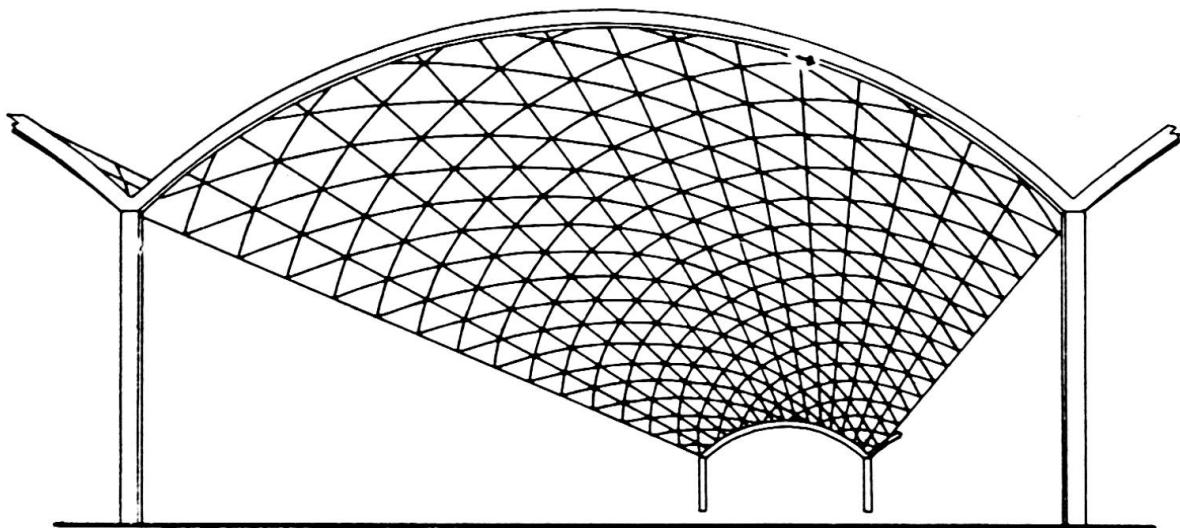


Fig. 1. Grande couverture métallique constituée par un voile continu en treillis métallique.

leur surface qui assurent des avantages importants comme celui de l'imperméabilité des parois de dépôts.

On peut étudier, du moins théoriquement, la possibilité de rabaisser les flexions ou de les altérer de telle façon qu'elles puissent accomplir les conditions de bord correspondantes aux voiles avec la simplification du calcul conséquente.

Une indication importante c'est que, malgré la légèreté de ces voiles qui arrivent à des sveltesse de $\frac{1}{600}$ (quotient de l'épaisseur à la portée) c'est le poids mort qui détermine le prix; ce poids ne peut guère être réduit, même avec des matériaux de meilleure qualité et un choix plus heureux de la forme de la surface, car il existe le danger d'un manque de stabilité ou de flambage qui limite la sveltesse; ce danger augmente par la présence des déformations lentes ou plastiques que souffre le béton sous l'action des compressions permanentes comme celles produites par le poids mort; nous donnerons plus loin un exemple d'un tel cas, quoiqu'il s'agit de fortes déformations produites par des causes imprévues qui donnèrent lieu à ce phénomène.

Il s'agit donc d'alléger le poids de ces constructions sans diminuer excessivement la rigidité du voile. Une bonne solution consiste à établir des anneaux de rigidité plus ou moins rapprochés. Mais ceux-ci présentent des inconvénients par suite de la difficulté inhérente aux coffrages et dispositifs d'imperméabilisation.

On peut également substituer le voile continu par un treillis métallique (fig. 1). Les grandes couvertures métalliques projetées normalement avec des éléments superposés en formant des constructions calculables par les simples méthodes de la résistance des matériaux, peuvent être substituées par d'autres où le treillis est disposé selon la surface.

A mon avis et, par tout ce que j'ai pu calculer et tâtonner, cette solution peut offrir des grands avantages et permettre la réalisation de couvertures économiques très élégantes d'aspect et faciles à réaliser.

Si la maille est suffisamment petite il semble parfaitement acceptable

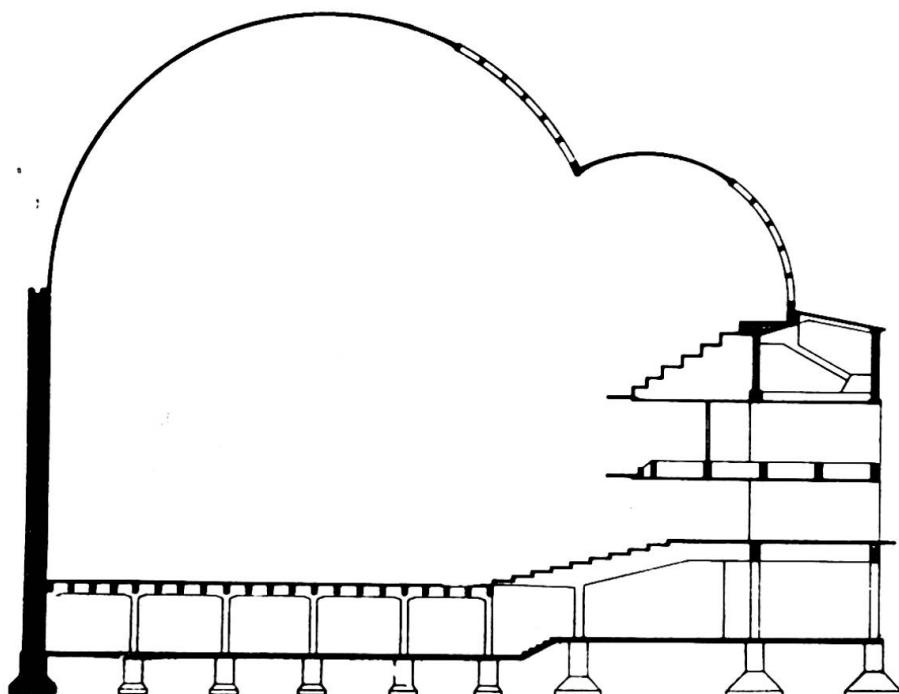


Fig. 2. Elévation du Recoletos construit en Espagne en 1936.

d'appliquer le calcul de voile continu pour déterminer après, et avec ses résultats, les efforts résultant à chaque barre de la triangulation.

Les études que j'ai pu faire dans ce sens indiquent clairement que ce type de construction peut être très économique par suite de la diminution du poids par rapport au béton, et aussi par la suppression des coffrages et échafaudage; on a déjà fait quelques projets en Espagne dans ce sens, pas encore réalisés, mais desquels on peut beaucoup espérer.

En dehors du problème théorique de calcul, il sera nécessaire de développer des investigations expérimentales dans les laboratoires, pour mieux connaître le comportement de ce type de construction et savoir si les efforts principaux dans les barres correspondent avec la théorie, et si les efforts secondaires, tels ceux de torsion dans les barres, sont négligeables ou non.

Une solution pratique est de disposer des profils droits selon les génératrices du cylindre et selon les diagonales nécessaires pour former avec les génératrices un treillis triangulaire; dans ce cas, les contraintes selon les directrices se traduisent par des compressions et selon les diagonales par des tractions produites isostatiquement dans les génératrices. Au contraire, l'effort selon la génératrice donne lieu à des compressions et déformations transversales très petites. Peut-être devrait-on étudier la lame anisotrope, mais ce problème nécessite une étude minutieuse théorique et expérimentale. On peut admettre les flexions, en première approximation, décomposées vectorialement sur les diagonales, quoique ceci donne lieu à des efforts de torsion et aussi à des anomalies difficiles à étudier. J'espère pouvoir réaliser une étude expérimentale qui promet d'être intéressante du point de vue technique.

Je termine cette communication en complétant l'information que j'ai donné au Congrès de 1936 sur un voile cylindrique qui est entré dans l'histoire pendant la guerre espagnole. Un mémoire détaillé de ce voile a été

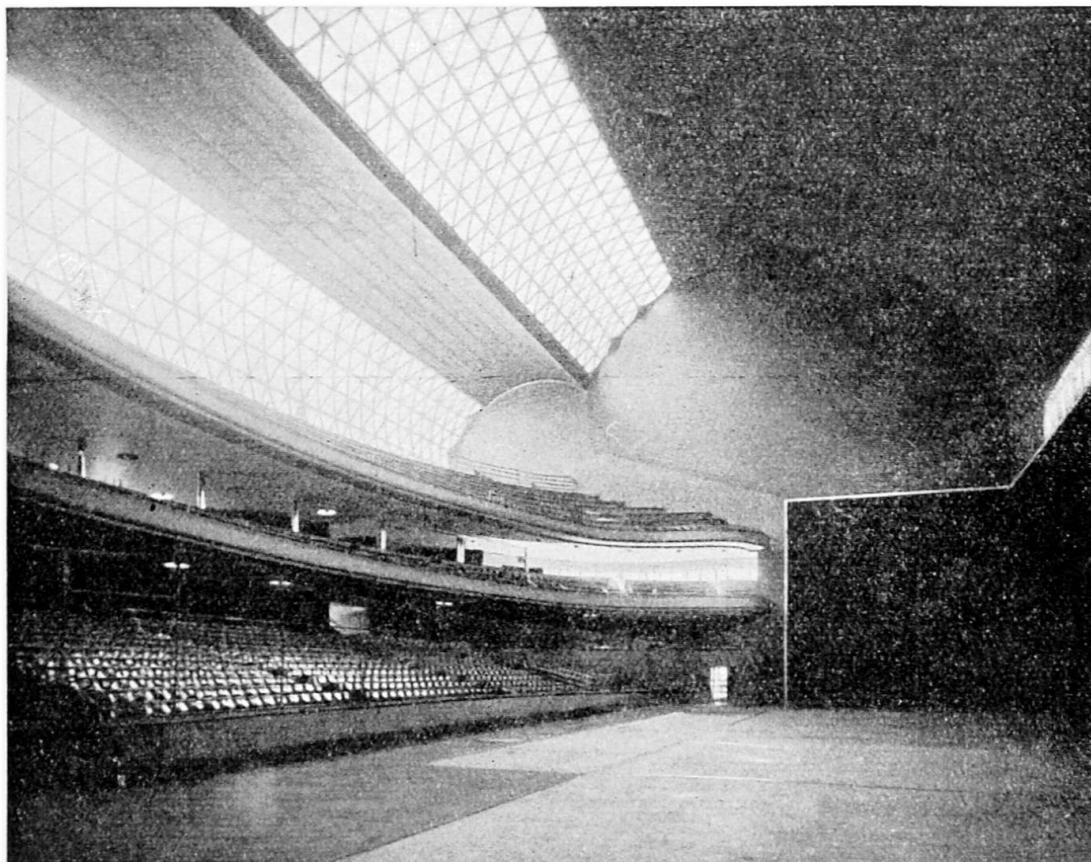


Fig. 3. Vue intérieure de la salle du Recoletos.

publié dans les Annales de l'Académie des Sciences de Madrid que je mets à la disposition de ceux qui s'intéressent à ce thème. Notons d'abord quelques raisons sur les phénomènes observés avant son écroulement, dû aux bombardements; ces phénomènes confirment les points que je viens d'indiquer.

On a exécuté en Espagne différents exemples de constructions en voiles minces, dont quelques-unes sont déjà connues par les publications faites dans différentes revues techniques, notamment celle du Fronton Recoletos, qui constitua l'objet d'une courte note que je présentai au Congrès de 1936. J'en dirai quelques mots sur son écroulement, à la suite des bombardements au cours de la guerre espagnole.

La toiture (fig. 2) peut être définie comme un voile cylindrique de génératrices horizontales, en béton armé, dont la directrice est formée par deux arcs de cercle inégaux lesquels, en partant des tangentes verticales aux bords, se rejoignent orthogonalement. Le voile a une épaisseur de 8 cm et est substitué sur une partie de sa surface par des treillis triangulaires du même matériau. La longueur des génératrices est de 55 mètres et la longueur entre les bords ou génératrices extrêmes de 32^m50. La figure 3 donne l'aspect intérieur de la salle.

La figure 4 donne le réseau des isostatiques ou lignes de tension principales obtenues par le calcul. La figure 5 représente un détail des armatures du voile, dont l'épaisseur de 8 cm augmente dans la zone immédiate à la mouette jusqu'à 17 cm. On peut aussi remarquer la disposition du tirant

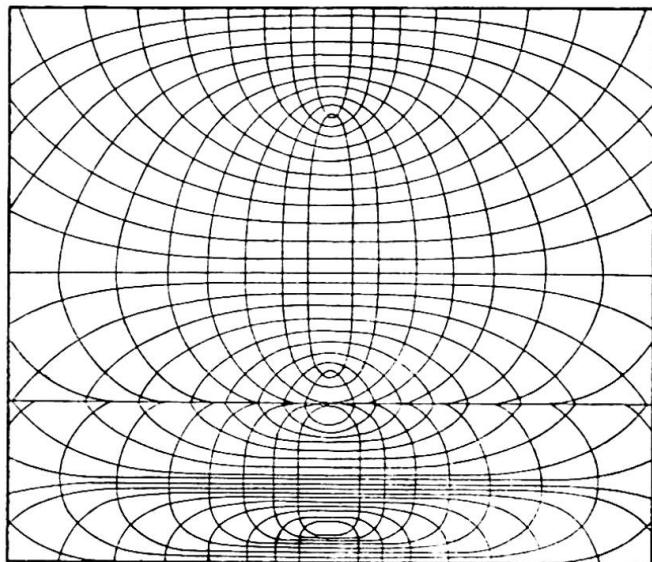


Fig. 4. Réseau des isostatiques obtenues par le calcul.

formé de 16 carrés de 50 mm, soudés bout à bout au moyen de soudure à l'arc avec électrodes enrobées.

L'importance de l'ouvrage justifia des essais sur modèle réduit (fig. 6) à échelle de 1/10, sur lequel on pourrait non seulement vérifier la résistance à la rupture, avec une surcharge supérieure à celle du calcul, mais aussi vérifier la correspondance entre les résultats du calcul et la réalité. On vérifia aussi cette correspondance par des mesures très minutieuses sur l'ouvrage même.

L'ouvrage se comporta parfaitement pendant trois années; avant la fin de la guerre, un bombardement d'aviation produisit plusieurs trous très importants tel que celui visible sur la figure 7 et un autre beaucoup plus grand, de 15 à 20 mètres, qui ne put être photographié. Jusqu'après

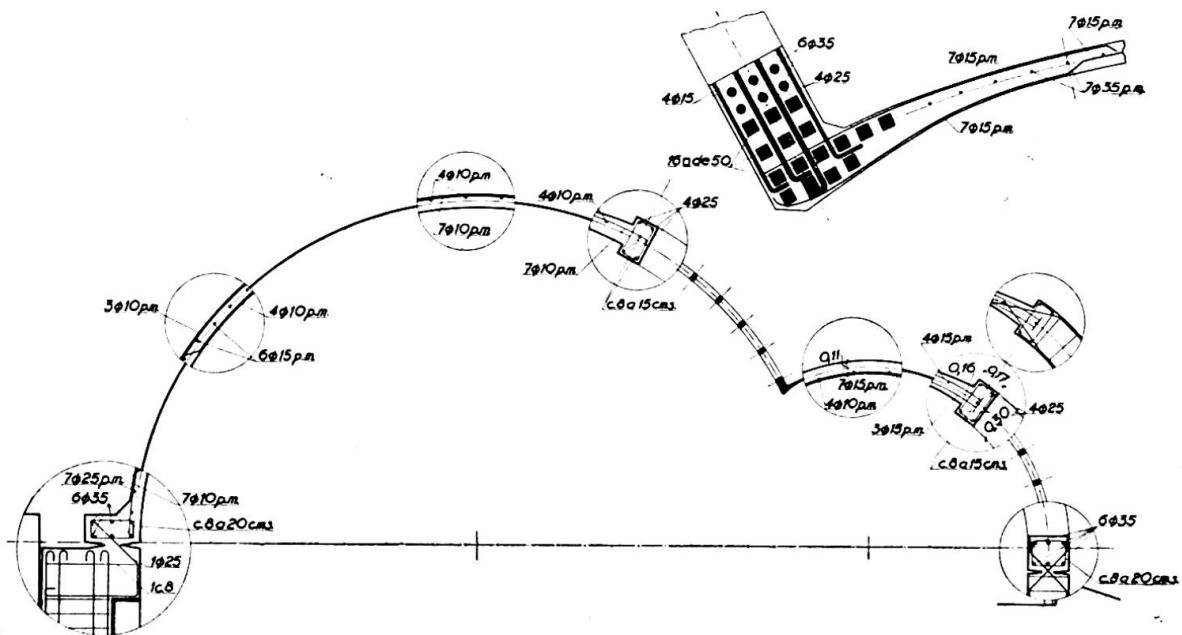


Fig. 5. Section transversale et détails constructifs du Fronton Recoletos.

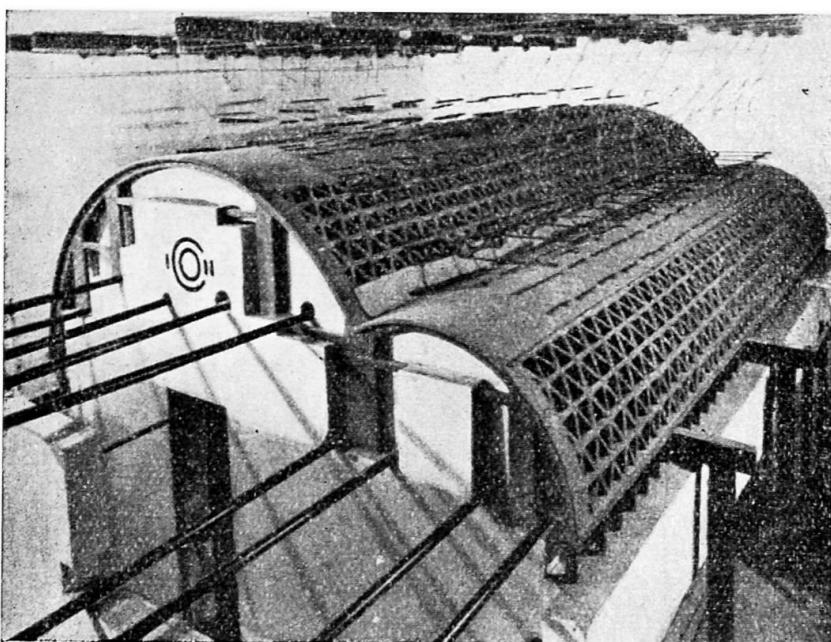


Fig. 6. Modèle réduit du Recoletos utilisé lors des essais de laboratoire.

la fin de la guerre, on ne put faire aucune inspection de l'ouvrage ni commencer les travaux de réparation qui ne purent avoir lieu par suite de l'écroulement qui survint entretemps.

Une fois la guerre terminée et la vie normale rétablie à Madrid, on découvrit le voile pour entreprendre sa réparation; on observa des fissures de deux millimètres dans les diagonales tendues de la lucarne, une descente ou enfoncement général de la lucarne, qui dans les directrices centrales dépassait 60 centimètres et déformait violemment la directrice dans la clef, avec des ouvertures de fissures qui atteignaient plusieurs millimètres et il était possible qu'il y eut encore d'autres défauts qu'on ne put déceler.

Tout paraissait indiquer que ce n'était pas l'impact même (auquel

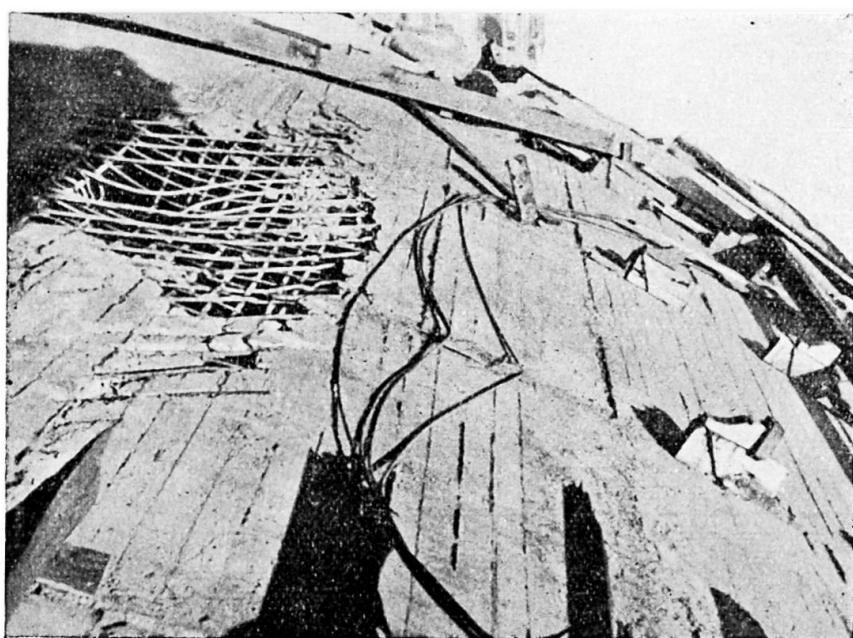
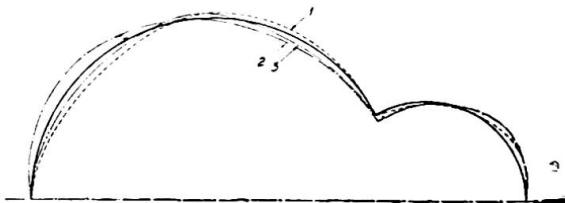


Fig. 7. Etat de la toiture après son bombardement au cours de la guerre civile.

Fig. 8. Déformations consécutives à l'onde explosive :

1. Effet instantané de l'onde positive. — 2. Effet instantané de l'onde négative. — 3. Stabilisation de la forme de la toiture après l'explosion.



l'ouvrage aurait résisté dans de bonnes conditions) mais l'onde explosive produite par les bombes qui fut la cause de toutes les anomalies observées.

En considérant le phénomène au moment de l'onde positive, c'est-à-dire de pression centripète sur l'arc, celui-ci dut éprouver un déplacement radial très grand vers l'intérieur (courbe I, fig. 8); la dalle put résister sans dépasser sa limite élastique grâce à sa grande élasticité; la lucarne avait tendance à se lever ; mais, non seulement sa plus grande rigidité, mais la courbure même du voile donnèrent lieu à un déplacement radial produisant une flexion beaucoup plus forte de la directrice vers la clef et, par conséquent, il s'y produisit une déformation plastique de l'armature, avec une dislocation complète du voile. Dans le moment de l'onde négative (courbe 2, 8) le phénomène fut contraire et la lucarne descendit. Des déplacements horizontaux durent se produire également dans la clef, et en particulier la composante de l'onde de succion poussa la clef vers la gauche et ouvrit les fissures par traction.

Une fois la résistance à la flexion nulle dans ce point, la lucarne dut descendre, en perdant sa courbure, et la clef s'éleva.

Il est intéressant d'indiquer qu'une fois qu'un déplacement important des génératrices hautes de la lucarne vers l'intérieur avait été produit, ces génératrices qui travaillent en compression, ont une forte tendance au flambage.

La génératrice comprimée, courbée vers l'intérieur tend naturellement à augmenter cette déformation par flambage. Les déformations plastiques du béton dans ces nouvelles conditions de travail, bien que petites à cause de l'âge du béton peuvent produire, vu le grand élancement de la pièce (c'est-à-dire les génératrices), des déplacements radiaux relativement grands dans une période de temps suffisamment longue. C'est pour cette raison que je conseillai la mise en place d'appareils de mesure pour observer si la déformation continuait ou non. On constata qu'elle continuait très lentement.

En envisageant le problème sur ces données et possibilités, on étudia l'avant-projet d'une réparation du voile (fig. 9) consistant à bétonner des anneaux ou nerfs armés selon les directrices sur le grand lobule jusqu'à la lucarne, fortement ancrés à la génératrice de celle-ci (la lucarne) d'un côté et dans la partie verticale du lobule de l'autre, et en les dotant de tenseurs dans l'armature longitudinale extérieure et des étriers d'ancre à la dalle, unis aussi par des tenseurs à la face extérieure des anneaux.

Pour effectuer les opérations que je viens d'indiquer on commença à monter un échafaudage et à découvrir la voûte en enlevant le revêtement de fibro-ciment de la partie supérieure et les verres des lucarnes, afin de faire aussi une révision plus détaillée de l'ouvrage.

Dans ces conditions, dans l'après-midi du 15 août 1939, lors d'un orage assez violent et d'une augmentation du degré hygroscopique, les

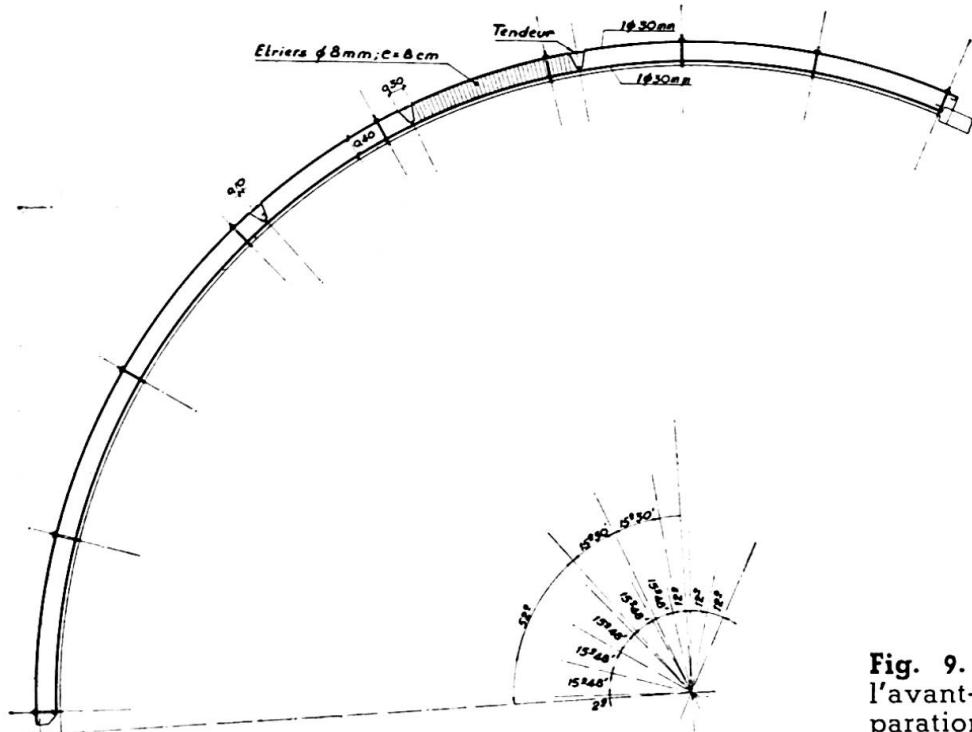


Fig. 9. Croquis pour l'avant-projet de réparation du voile.

appareils de contrôle accusèrent une accélération rapide de la descente de la lucarne.

Avant minuit, l'écroulement complet survint, dû à la continuation des mouvements (fig. 10) c'est-à-dire provoqué par un accroissement très important de la perte de courbure des directrices centrales de la lucarne, avec une torsion initiale importante de ces directrices et avec une forte

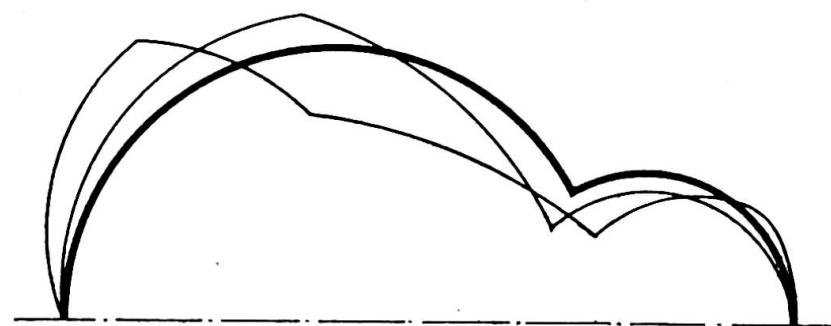
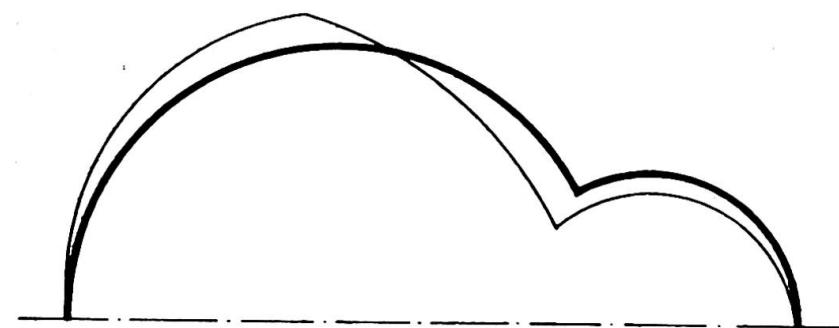


Fig. 10. Diverses phases de l'écroulement de la toiture endommagée.

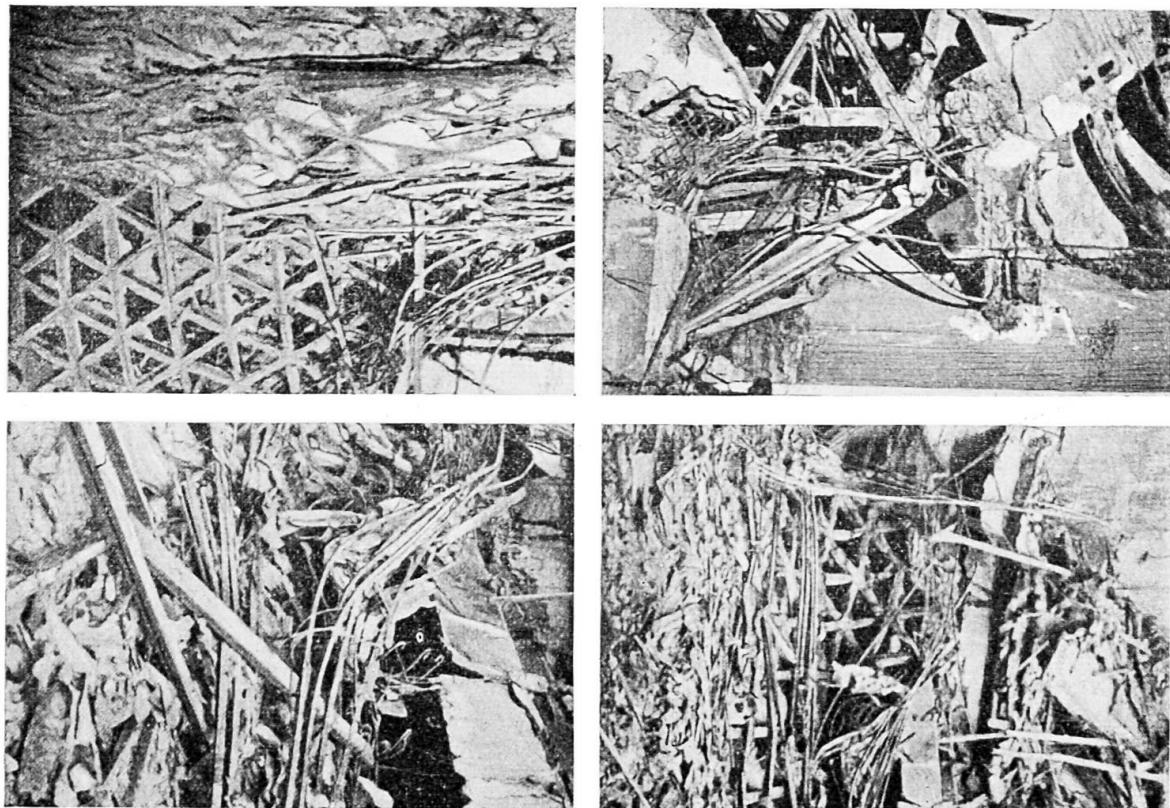


Fig. 11. Divers aspects de la désagrégation du béton.

augmentation de la poussée horizontale dans la clef, laquelle poussa le grand lobe, en tombant une partie de celui-ci dans la zone latérale, en dehors du mur.

Etant donné la grande hauteur du bâtiment (25 m) le béton se désagrégua complètement (fig. 11). Comme je l'ai déjà dit auparavant la résistance de la poutre en mouette fut beaucoup plus grande que prévue, puisque les zones extrêmes de la lucarne qui supporte les efforts tranchants minima, restèrent intactes en grande partie. Les armatures du tirant formées de 16 carrés de 50 mm soudées électriquement bout à bout et recouvertes d'une section de béton relativement petite, furent arrachées du béton mais sans se rompre, pas même dans leur section soudée, malgré les efforts énormes qu'elles durent éprouver aux derniers moments:

Abstraction faite des détails et hypothèses des causes immédiates de l'effondrement, il est important de noter, du point de vue technique, que l'écroulement fut produit indubitablement, pas par un défaut dans les travaux que nous pourrions considérer comme principaux de la construction, mais exclusivement par un manque de rigidité transversale des directrices centrales de l'arc dans le grand lobe, causé par la rupture et déformation brusque de ces directrices, sous l'action de l'onde explosive.

On voit aussi la grande importance que peut avoir le flambement causé par la déformation lente ou plastique du béton; c'est un des points sur lesquels il est intéressant d'investiguer, puisque dans la plupart des cas, c'est précisément le danger du flambage plastique qui détermine les limites de sveltesse qu'on peut atteindre dans ce genre de constructions en béton armé.

Résumé

On expose les observations effectuées pendant l'écroulement d'un voile cylindrique de lobules inégaux, produit par suite des bombardements, qui introduisirent des fortes ruptures et déformations plastiques suivies d'un flambage des génératrices comprimées.

L'auteur signale aussi l'intérêt que peut avoir la substitution des voiles continus en béton par des treillis métalliques inscrits dans la surface.

Zusammenfassung

Der Verfasser beschreibt das Verhalten eines aus zwei Zylinderschalen mit ungleichen Radien zusammengesetzten Bauwerks nach dessen Bombardierung. Diese verursachte grosse plastische Deformationen, die zum Knicken der gedrückten Erzeugenden führten, sodass die Tragkonstruktion zusammenbrach. Die aus den Beobachtungen sich ergebenden Schlüsse werden gezogen.

Der Verfasser erwähnt auch die Möglichkeit, die vollen Betonschalen durch metallische Fachwerke zu ersetzen, die nach der Oberfläche geformt sind.

Summary

The author explains the observations carried out during the collapse of a cylindrical slab of unequal lobules, caused as a result of bombardments and which produced serious ruptures and plastic deformations followed by a buckling of the compressed generators.

He also points out the advantage that may lie in substituting for continuous reinforced concrete slabs, metal latticework implanted in the surface.