

# Construction d'une coque en béton armé à Chiasso

## Construction of an ellipsoidal concrete shell in Chiasso

Aurelio Muttoni, Franco Lurati, Miguel Fernández Ruiz

### Introduction

Cet article résume les propriétés principales ainsi que les méthodes utilisées pour la construction d'une coque à forme ellipsoïdale en béton armé avec une portée maximale de 92,8 m et avec une épaisseur type de 10 cm. La structure était bétonnée avec du béton projeté (dans les zones de pente importante) et avec du béton coulé en place (pour les zones avec pente modérée ou faible). Le renforcement de la coque est composé de barres d'armature conventionnelles, de même que de fibres métalliques, de précontrainte et de clous en acier selon les différents zones et les efforts de réduction agissant.

### Conception et dimensionnement

#### Géométrie et propriétés principales de la coque

Les dimensions de la coque ellipsoïdale sont 92,8 m (axe long) ×

### Introduction

This paper summarizes the main properties and building techniques used for the construction of an ellipsoidal concrete shell with a maximum span of 92.8 m and a general thickness of 10 cm. The structure was cast both in sprayed concrete (for large slopes) and in ordinary concrete (for moderate or low slopes) and was reinforced with conventional reinforcement, metallic fibres, post-tensioning and shear studs depending on the location and internal forces of the shell.

### Design

#### Geometry and main properties of the shell

The ellipsoid shell has axis dimensions of 92.8 m (long axis) × 51.8 m (small axis) × 22.5 m (height). The ellipsoid is cut by a horizontal plane and is supported on a concrete basement composed of transverse walls, leading to a total

51,8 m (axe court) × 22,5 m (hauteur). L'ellipsoïde est sectionné par un plan horizontal qui est constitué d'un socle en béton composé de voiles verticaux transversaux, avec une hauteur totale de 18,24 m, voir Figure 1. Une description plus détaillée de la géométrie et des raisons qui la justifient peut être consultée sous [1].

L'épaisseur de la coque était variable. Une valeur de 100 mm était tenue par défaut, justifiée par de raisons constructives (enrobage minimal) et afin d'écartier les risques de voilement. Quatre nappes d'armature étaient disposées, deux à l'intrados et deux à l'extrados de la coque. Les nappes d'armature étaient orientées suivant les directions radiales (méridiens) et tangentielles (parallèles) de l'ellipsoïde. Ceci était justifié comme étant la disposition la plus efficace pour des raisons statiques. La disposition de quatre

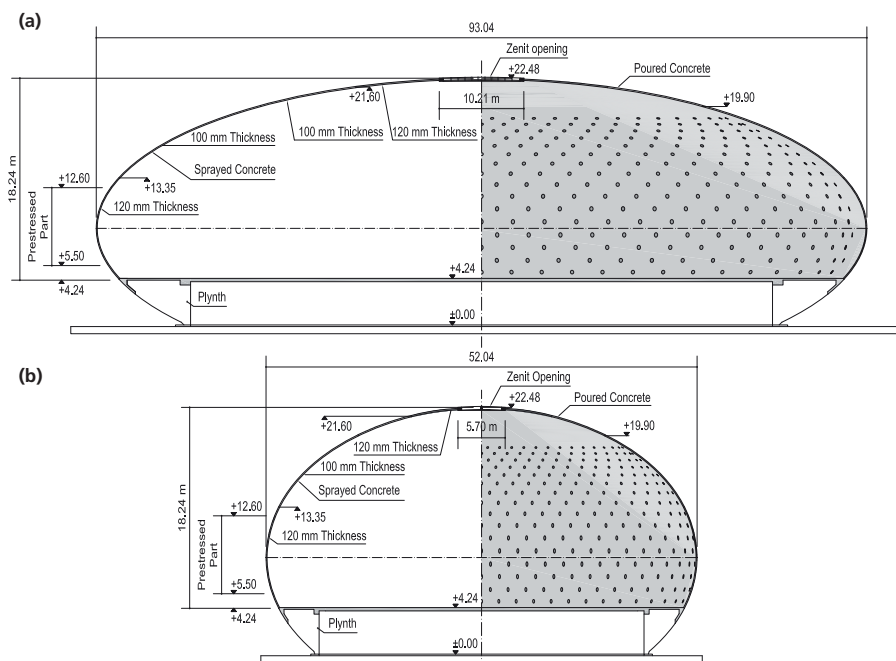
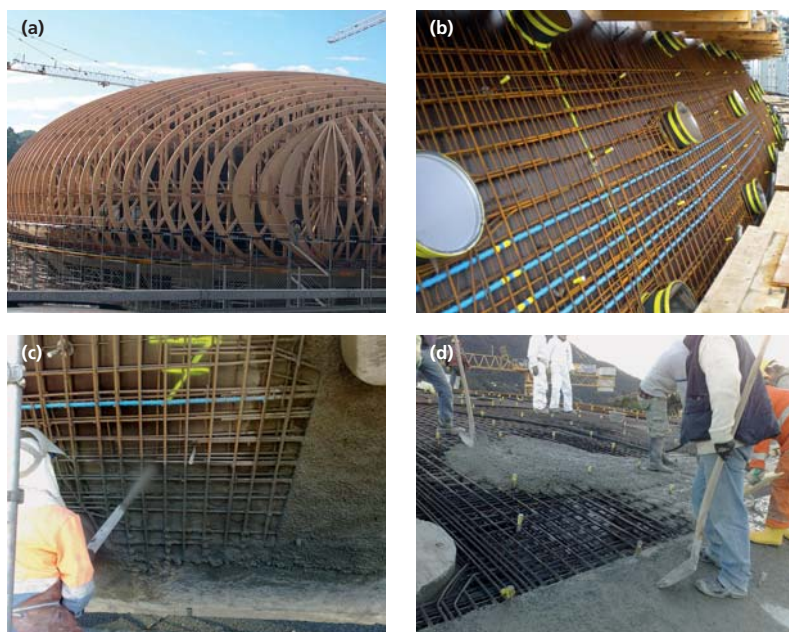


Fig. 1

Dimensions principales: a) coupe selon l'axe longue; et b) coupe selon l'axe court.

Main geometrical dimensions: a) section along long axis; b) section along small axis.



**Fig. 2**  
 Construction de la coque: a) échafaudage; b) disposition de la précontrainte;  
 c) projection du béton; et d) béton coulé sur place.  
 Construction of the shell: a) temporary scaffolding; b) placing of prestressing  
 tendons; c) spraying of concrete; and d) pouring of concrete.

height for the shell of 18.24 m, see Figure 1. An extended description on the geometry and its reasons can be consulted elsewhere [1].

The thickness of the shell was variable. A value of 100 mm was selected as the default thickness. This was justified by constructional reasons (minimum thickness of necessary reinforcement cover) and also to ensure sufficient safety against buckling. Four reinforcement layers were provided, two at the intrados and two at the extrados of the shell. The reinforcement layers were oriented in the radial (meridian) and tangential (parallel) directions. This was selected as the most effective layout for statical reasons. The arrangement of the four layers was required to control bending moments and shear forces developed at the basement connection, near the prestressed zone and for connecting to the steel piece placed at the zenith opening (Fig. 1). Bending moments and shear forces in other regions were quite small. Four reinforcement layers were nevertheless arranged in all regions for con-

nappes d'armature permettait le contrôle des moments de flexion et des efforts tranchants se développant à la base de la coque (intersection avec le socle), dans la zone précontrainte et pour connecter les profils en acier d'une pièce disposée dans l'ouverture zénithale de la coque (Fig. 1). Dans d'autres régions, les moments de flexion et les efforts tranchants étaient très modérés, voir négligeables. Cependant, la disposition de quatre nappes d'armature était respectée pour des raisons constructives, pour assurer un comportement correct vis-à-vis de la fissuration (pouvant se développer pour certains cas de charges) et pour écarter des risques de voilement.

En plus de l'armature conventionnelle, 35 torons de précontrainte (mono-torons de 0,6" de diamètre) étaient disposés à proximité de l'équateur de la coque (depuis le niveau +5,50 m jusqu'au niveau +12,60 m, voir Fig. 1) afin de reprendre les efforts membranaires dans la direction horizontale. L'épaisseur de la coque était, pour des raisons constructives, augmentée dans cette zone à 120 mm

structural reasons, to ensure suitable crack control (which may potentially occur depending on the load cases) and to ensure sufficient safety against buckling of the structure.

In addition to the ordinary reinforcement, 35 post-tensioning tendons (0.6" monostrand tendon) were arranged near the equator of the shell (from level +5.50 m to level +12.60 m, see Fig. 1) to carry membrane tension along the horizontal direction (they presented in addition a limited dimension for the plastic duct thus minimizing the disturbance in the compression field developing through the shell). The thickness of the shell was increased in this region to 120 mm (between levels +4.24 and +13.35 m).

At the level of the connection to the concrete basement (between levels +4.24 and +5.14 m) shear studs were also installed to provide sufficient shear strength and deformation capacity in this region (subjected to parasitic shear forces and bending moments).

The thickness of the shell was also 120 mm from level +21.60 m to the zenith opening. On the top

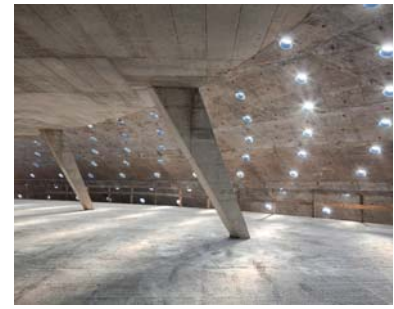


Fig. 3  
Ouvrage fini.  
Completed work.

(entre les niveaux +4,24 m et +13,35 m).

Au niveau de la connexion avec le socle en béton (entre les niveaux +4,24 m et +5,14 m), des clous (armature transversale avec têtes d'ancrage) étaient disposés afin de garantir une résistance et capacité de déformation suffisante dans cette région (soumise à des moments de flexion et à des efforts tranchant accrus). L'épaisseur de la coque dans cette zone était augmentée à 120 mm, tout comme depuis le niveau +21,60 m jusqu'à l'ouverture zénithale (10,21 m × 5,70 m). Cette dernière augmentation d'épaisseur permet de connecter une structure métallique à travers laquelle la lumière entre dans l'espace intérieur de la coque. En outre, entre les niveaux +4,81 m et +18,78 m, des ouvertures circulaires de 0,40 m de diamètre étaient disposées, voir Figure 1.

#### Propriétés du béton

La structure était bétonnée avec du béton projeté depuis le niveau +4,24 m jusqu'au niveau +19,90 m. Ceci permettait d'utiliser du coffrage conventionnel (seulement d'un côté) pour toute la coque. Quand la pente était suffisamment faible (moins de 20°, depuis le niveau +19,90 jusqu'au niveau +22,48 m), le béton était coulé ordinairement. Pour les deux types de béton, la résistance caractéristique à la compression ( $f_{ck}$ ) à 28 jours était spécifiée à 30 MPa.

Dans la région du béton projeté, entre les niveaux +4,24 m et +13,36 m, des fibres métalliques avec crochet (30 kg/m<sup>3</sup>) étaient utilisées. Ces fibres avaient une

part, the increased thickness allowed the concrete shell to be connected to a steel structure placed at the zenith opening (10.21 m × 5.70 m), allowing daylight to reach the inside of the mall. In addition, between levels +4.81 m and +18.78 m a number of circular openings (diameter 0.40 m) were also arranged, see Figure 1.

#### Concrete properties

The structure was cast using sprayed concrete from level +4.24 m to level +19.90 m. This allows using conventional (one-side) formwork for the entire shell. Where the slope was sufficiently limited (lower than 20°, from level +19.90 to level +22.48 m) concrete was poured conventionally. For both concrete types a characteristic compressive strength ( $f_{ck}$ ) at 28 days equal to 30 MPa was specified.

In the sprayed concrete region, between level +4.24 m and level +13.36 m, hooked metallic steel fibres (30 kg/m<sup>3</sup>) were used. The

longueur de 30 mm et un rapport longueur-sur-diamètre de fibre de 80. Les fibres étaient disposées afin d'améliorer le contrôle de la fissuration (particulièrement dans la région précontrainte) et pour améliorer la capacité de déformation du béton soumis à des efforts tranchants et des forces normales accrues (zone de liaison avec le socle). Le béton projeté comportait 300 kg/m<sup>3</sup> de ciment et 25 kg/m<sup>3</sup> de chaux. Cette dernière était disposée afin d'améliorer la mise en place du béton. Des tailles de granulats entre 0 et 4 mm étaient utilisés pour 70% de la structure, le reste étant entre 4 et 8 mm. L'addition d'eau était effectué dans le pistolet de projection (projection par voie sèche).

#### Construction de la coque

Le coffrage de la coque était disposé sur des cintres et un étayage en bois, Figure 2a. Le coffrage était composé de panneaux en bois pliés sur place et vissés (Fig.

#### Equipe/Team

Client/Owner  
Centro Ovale 1 SA, Chiasso

#### Architecture

Elio Ostinelli, Chiasso

#### Conception de la structure et ingénierie/Structural design and engineering

Aurelio Muttoni, Franco Lurati, Miguel Fernández, Mendrisio et Lausanne

#### Entreprise de construction/contractor

Muttoni SA, Bellinzona

#### Coûts/Costs

CHF 5 300 000.- (TVA et honoraires inclus/VAT and design costs included)

#### Références/References

[1] A. Muttoni, F. Lurati, M. Fernández Ruiz; Concrete shells – Towards efficient structures: Construction of an ellipsoidal concrete shell in Switzerland, Structural Concrete, Ernst & Sohn, Germany, Vol. 14, No. 1, pp. 43–50





fibres had a length of 30 mm and a length-to-diameter ratio of 80. The fibres were introduced to enhance crack control (in the post-tensioned region) and to improve the ductility of concrete under high normal and shear forces (at the connection to the basement). The sprayed concrete comprised 300 kg/m<sup>3</sup> of cement and 25 kg/m<sup>3</sup> of lean lime. The latter was to enhance the workability of the concrete. The aggregate sizes between 0 and 4 mm were 70% of the total, the rest ranging between 4 and 8 mm. The addition of water was performed at the spraying gun.

### Construction of the shell

Formwork was placed against a wood scaffolding, Figure 2a. The formwork consisted of panels bent in situ and fixed in their corresponding position (Fig. 2b). The reinforcement was then placed and concrete was sprayed or poured in situ (Fig. 2c and 2d). The time required for placing of the reinforcement and concreting the shell was about 3 months in total. After concreting, decentering of the shell was carried out. This is probably the most critical phase and has led in some cases to the collapse of a shell structure. In the present case the shell was constructed in a number of phases in order to avoid decentering to be the governing design situation. First, half of the post-tensioning force was applied (one out of two tendons post-tensioned). Then, the wood scaffolding in contact with the post-tensioned zone was removed, followed by the post-tensioning of all tendons. This

2b). L'armature était ensuite disposée et le béton était projeté ou coulé sur place (Fig. 2c et 2d). Le temps requis pour disposer les armatures et pour bétonner la coque était d'environ 3 mois au total.

Après le bétonnage, la coque était décintrée. Ceci est probablement l'opération la plus délicate ayant mené plusieurs fois dans le passé à des effondrements totaux ou partiels des coques. Dans le cas de la coque de Chiasso, une série de phases étaient définies afin que le décintrage ne soit pas la situation du projet déterminante. D'abord, la moitié des câbles de post-tension était mis en tension (un sur deux). Ensuite, la partie du coffrage en contact avec la zone précontrainte était enlevée, suivi par la mise en tension de la totalité des câbles de post-tension. Cette démarche permettait d'assurer le transfert correct et effectif des forces de précontrainte à la coque. Finalement, les étais verticaux étaient graduellement descendus, menant au décintrage complet de la coque. Les flèches mesurées pendant ce procédé étaient en bon accord avec les valeurs prédites. Quelques photos de la structure finalisée peuvent être observés dans la Figure 3.

Les coûts de l'ouvrage sont répartis à 49% pour le coffrage et l'étagage, 21% pour l'armature ordinaire, 5% pour la précontrainte, 24% pour le béton projeté et 1% pour le béton coulé sur place. Ceci montre que les coûts associés au coffrage et à l'étagage demeurent très importants et que des techniques plus efficaces sont encore à développer.

operation ensured correct post-tensioning transfer to the concrete. Finally, the vertical struts of the scaffolding supporting the top region of the shell were gradually released, leading to the complete decentering of the structure. Measured deflections recorded during the process were in good agreement with predicted values. Some pictures of the completed work can be seen in Figure 3.

The cost of the concrete structure corresponded to 49% for the scaffolding and formwork, 21% for ordinary reinforcement, 5% for post-tensioning, 24% for the sprayed concrete and 1% for the poured in-situ concrete. This shows the relatively large cost of scaffolding and formwork for these types of structures, and points to a fruitful future research topic to obtain more efficient techniques.

#### Auteurs/Authors

##### Aurelio Muttoni

Prof. Dr ès techn. ing. dipl. EPFZ  
Muttoni et Fernández,  
Ingénieurs Conseils SA  
CH-1024 Ecublens  
aurelio,muttoni@mfc.ch

##### Franco Lurati

Ing. dipl. EPFZ  
Lurati Muttoni Partner SA  
CH-6850 Mendrisio  
franco.lurati@lmpartner.ch

##### Miguel Fernández Ruiz

Dr ing. dipl. UPM  
Muttoni et Fernández,  
Ingénieurs Conseils SA  
CH-1024 Ecublens  
miguel.fernandezruiz@mfc.ch