

Reconstruction des structures du Dôme de Milan

Autor(en): **Ferrari da Passano, Carlo / Oberti, Guido**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **46 (1983)**

PDF erstellt am: **21.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-35860>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Reconstruction des structures du Dôme de Milan

Wiederaufbau der Tragstruktur des Mailänder Doms

Rebuilding of the Supporting Structure of the Dome de Milan

Carlo FERRARI DA PASSANO

Dr. Eng.

Adm. della Fabbrica del Duomo
Milano, Italy



Carlo Ferrari da Passano, né en 1917, ingénieur civil, a exercé une vaste activité dans le domaine des constructions et de la restauration des monuments. Depuis 1965 il est l'Architecte de la V. Fabrique de la Cathédrale de Milan.

Guido OBERTI

Prof. Dr.

ISMES
Milano, Italy



Guido Oberti, né en 1907, a été professeur de constructions civiles aux Polytechniques de Milan et de Turin. Directeur puis Président Honoraire de l'ISMES. Membre d'honneur de plusieurs Associations Internationales. Ingénieur conseil dans le domaine des ponts et grands barrages.

RESUME

La contribution explique les raisons et le but de la reconstruction des colonnes centrales soutenant le «tiburium» du Dôme. Après elle se déroule en deux parties. La première expose les essais, effectués à l'aide d'un modèle élastique et de différents modèles physiques poussés jusqu'à la rupture. Les résultats les plus importants sont présentés. La deuxième partie donne des renseignements sur l'oeuvre de reconstruction choisie, actuellement en cours, et expose le système adopté sur le chantier pour le contrôle automatique des déformations et des contraintes.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag zeigt die Gründe und den Zweck des Wiederaufbaus der Zentralsäulen, die die Domkuppel stützen, auf. Dann teilt sich der Beitrag in zwei Teile. Im ersten werden elastische Modellversuche des Zentralteils und der angrenzenden Seitenschiffe sowie Versuche an grossmassstäblichen Stützen bis zum Bruch beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse erläutert. Der zweite Teil beschreibt die jetzigen Aufbauarbeiten sowie die installierten automatischen Verformungs- und Spannungskontrollen.

SUMMARY

This paper first explains the reasons and the aim of the rebuilding of the central columns which support the cupola of the Cathedral. It is then divided into two parts. The first part sets forth tests carried out, both with the aid of an elastic model of the Cathedral's central section including the cupola and relevant naves, and by using various large-scale models of the columns, tested to failure. The second part provides information on the rebuilding work being carried out, and briefly describes the system used on site for the automatic control of strains and stresses.



1. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

Le Dôme de Milan se lève au centre de la ville sur un terrain où, déjà à la époque romaine, on avait établi d' importants bâtiments civils et religieux. Le commencement de la construction, qui remonte au 1386, est lié aux événements politiques de cette époque en Italie et, en particulier, à Milan, lorsqu' avec Jean Galeazzo Visconti en 1385 l' on atteint l' unification du Duché dont les visées égémoniques s' étendirent presque à toute l' Italie septentrionale entraînant et poussant dans la participation à cette réalisation le clergé, dans la personne de l' Archevêque Antonio da Saluzzo, et tout le peuple de Milan.

Le style du monument est inspiré au gothique de l' Europe centrale qui, à cause de nouvelles particulières élaborations introduites par l' art lombard en phase de projet et d' exécution, en a fait un exemplaire unique.

Les cinq siècles qui ont été nécessaires pour achever cette Cathédrale, eurent de remarquables conséquences soit stylistiques que statiques, qui encore aujourd' hui sont évidentes et d' une extrême actualité.

Les moments les plus significatifs furent le bâtiment de la grande coupole du Tiburium en 1500, la réalisation de la grande flèche en 1774 et l' achèvement de la façade en 1813.

Le matériel qui aurait dû être employé pour la construction, selon le projet originaire, était en brique et il fût, au contraire, remplacé pour toutes les parties en vue, soit internes que externes du monument, par le marbre de Candoglia qui est un carbonate de chaux au 98% de structure cristalline et avec d' excellentes caractéristiques chimico-physiques: résistance à la rupture (par compression simple) supérieure a 1.000 Kg/cm^2 ; module élastique moyen 500.000 Kg/cm^2 .

Les fondations du Dôme, constituées par plinthes isolés pour les piliers de la grande nef, du transept et de l' abside et par structures continues périmétrales, ont été posées au limite du niveau de l' "aves", à ce temps là entre les 7-8 mètres au dessous du plan de campagne sur un terrain alluvial, formé de gravier et de sable avec des infiltrations de vase et de couches de vase sableux et argilleux jusqu' à la profondeur de 120 mètres, au dessous on a des terrains lacustres et fluvio-lacustres de l' ancien quaternaire.

Les principaux éléments statiques de la construction sont représentés par les grandes colonnes, les quatre du "Tiburium", et les piliers secondaires, objet de l' intervention statique (Fig. 1 et 2).

La composition des piliers est hétérogène et constituée par une couronne périmétrale en marbre de Candoglia, avec huit nervures grandes qui s' alternent avec quatre petites, et par un noyau intérieur, formé par des couches non pas liées avec celles du marbre, et qui a une épaisseur assez variable, composé de briques, de pierres de "Serizzo" et d' écailles de marbre, liées ensemble avec du mortier de chaux et de sable.

Le rapport entre les surfaces des deux types de la section horizontale des piliers est presque égale. Le diamètre moyen des colonnes du Tiburium, qui soutiennent un poids de 3.200 t, double des autres, résulte de m 2,90 contre m 2,45 des piliers secondaires. La valeur de la charge transmise au terrain

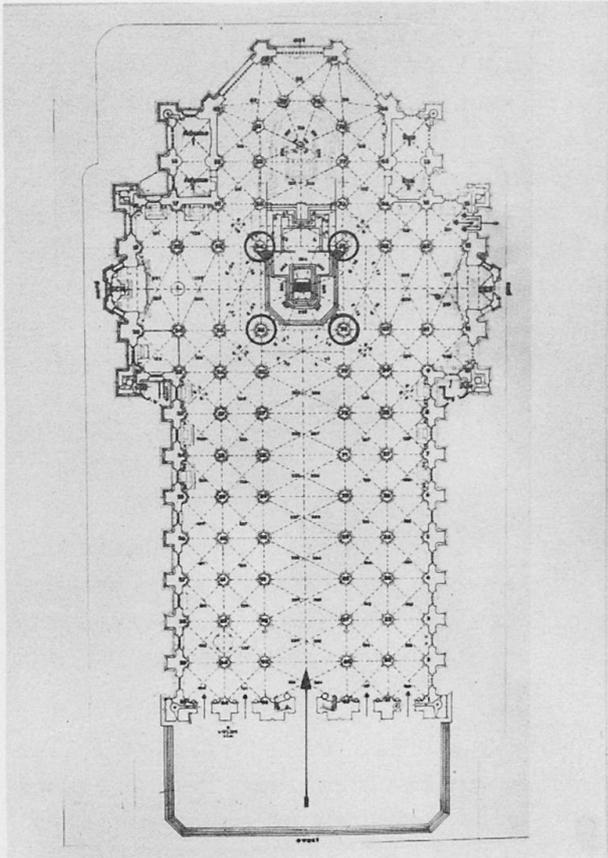


Fig. 1 Plan de la Cathédrale et indication des 4 piliers du Tiburium

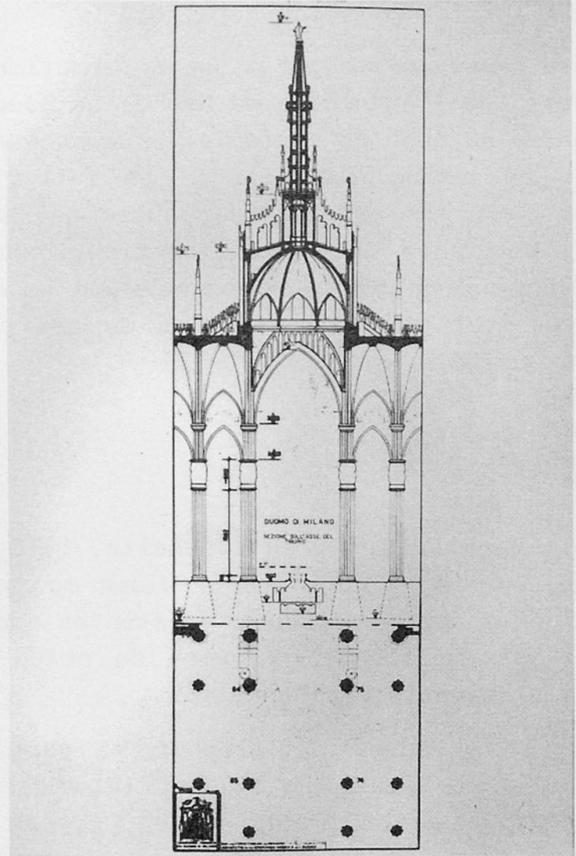


Fig. 2 Section verticale suivant le axe principal du Tiburium



Fig. 3 Le modèle élastique, à échelle 1:15, vue d'ensemble, prêt pour les essais

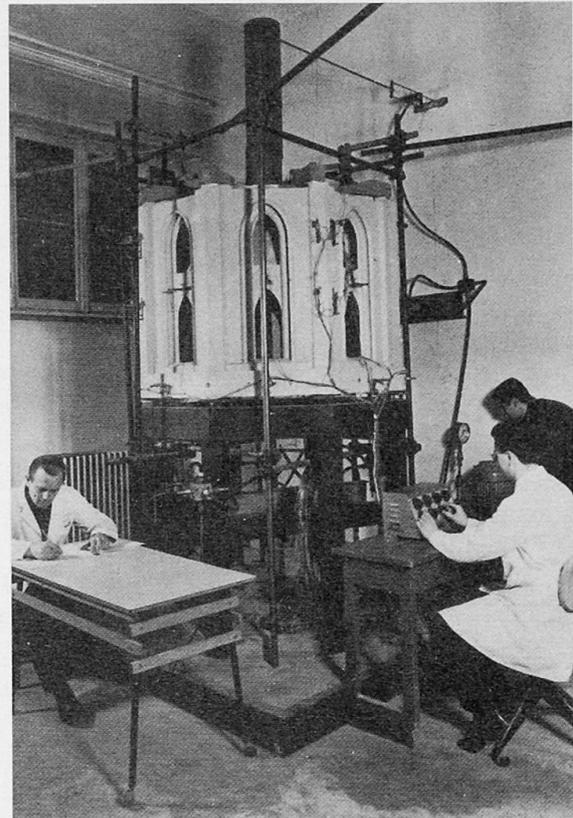


Fig. 4 Le modèle élastique, partie supérieure, prêt pour les essais



par les fondations des piliers principaux est de $7,5 \text{ Kg/cm}^2$.

Les causes principales des déformations apparues ont été des lésions très graves dans les éléments en marbre de la couronne extérieure, ainsi qu' il a été nécessaire en 1969 de soutenir les quatre colonnes centrales avec un gainage provisoire en béton armé afin d' en éviter l' écroulement. Les causes des dégâts, on peut les reconnaître, outre que dans l' ancienneté du monument et dans les vicissitudes de la construction, dans les évidents affaissements différentiels des piliers dûs à la remarquable baisse de la nappe phréatique (25 m en vingt ans) et aux perturbations du trafic, souterrain et de surface, présent tout autour du monument.

2. LES ESSAIS SUR MODELES

a) Un modèle à grande échelle, 1:15, bâti avec différents matériaux élastiques appropriés (liés avec résines époxy) fut exécuté, chez ISMES, pour évaluer l' état des contraintes existantes dans les piliers du Tiburium, qui soutiennent la grande flèche, à cause du poids propre, à la tension des chaînes et aux affaissements des fondations.

On a reproduit entièrement la partie centrale du Dôme, c' est-à-dire: les 4 piliers centraux et les 12 adjacents soutenant le Tiburium, les 4 voûtes relatives à la grande nef et, encore, les 4 voûtes des nefs secondaires (Fig. 3 et 4).

Le poids propre, soit des structures supportées par le Tiburium et soit des autres voûtes reproduites, a été réalisé avec l' emploi de ressorts dynamométriques en "caoutchouc" (Fig. 5), ancrés, à l' aide de tirants verticaux, au modèle en haut et à une plaque horizontale en bas. Cette plaque, réalisée avec des poutres en acier assez rigide, pouvait être déplacée verticalement à l' aide de vérins hydrauliques pour donner, dans un seul coup, la charge correspondante au poids propre.

A la base de chaque pilier on a réalisé, en celluloïd, un bloc simulant les caractéristiques géométriques et de déformabilité élastique, prévues pour les fondations réelles (Fig. 6).

On a conduit des essais, avec un large emploi d' extensomètres électriques, pour évaluer les déformations et donc les contraintes, en domaine élastique, dues au poids et celles qui étaient conséquentes à la tension exercée par les quatre chaînes placées aux naissances des grands arcs en Serizzo soutenant la voûte du Tiburium (*).

En outre il a été examiné l' effet de l' affaissement des fondations, soit des piliers principaux soit de ceux des nefs latérales, sur la charge verticale supportée par chacun de ces piliers, avec l' emploi de spéciales cellules de mesure connexées à une centrale automatique pour la relévation des données.

(*) Le comportement élastique, linéaire, du modèle a été contrôlé au moyen d' essais préliminaires.

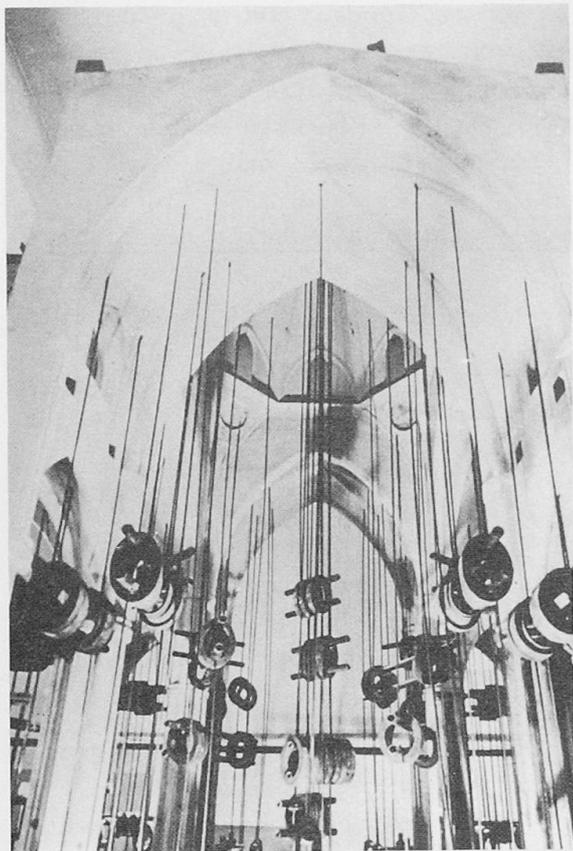


Fig. 5 Dispositif de charge (au poids propre) du modèle élastique

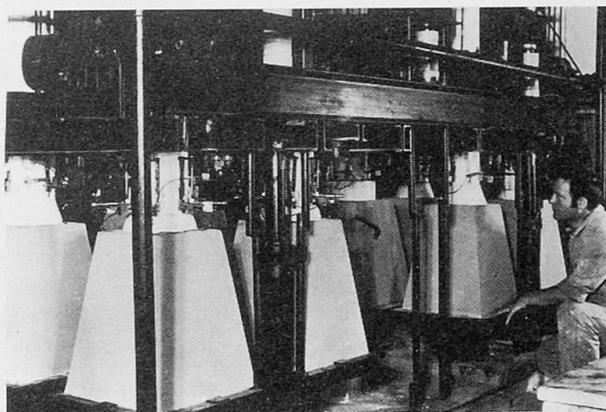


Fig. 6 Particularités des fondations du modèle

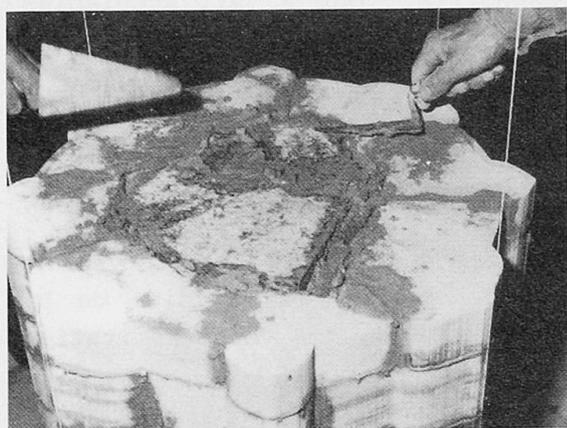


Fig. 7 Assemblage des blocs constituant les grands modèles

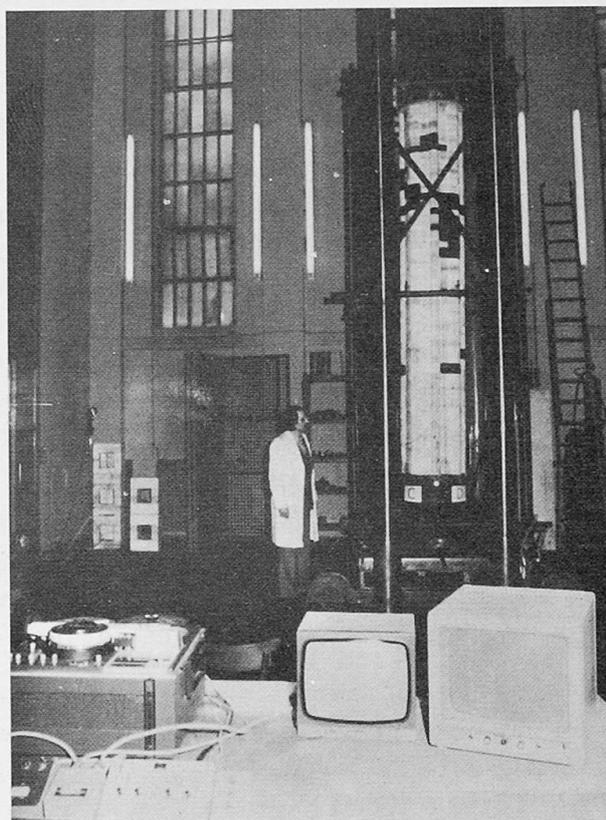


Fig. 8 Modèle d'une des colonnes sous la presse de 2.000 t



Les conditions les plus défavorables sont apparues lorsqu' on a produit le affaissement d' un des piliers principaux qui soutiennent le Tiburium. Avec un abaissement correspondant à un centimètre on a enregistré une réduction d' environ un tiers de la charge supportée par le pilier intéressé et une augmentation correspondante dans les piliers qui l' entouraient de l' ordre de 15%.

b) Les essais à rupture avec l' emploi de modèles à grande échelle des piliers principaux du Tiburium

Ces essais, qui ont pris presque dix années, ont été commis à ISMES de Bergamo par le Dr. Ing. C. Ferrari da Passano, dirigeant la Ven. Fabrique de la Cathédrale, suivant les conseils d' une Commission d' experts nommée par le Préfet de Milan.

Tous les modèles représentaient fidèlement, à grande échelle (1:4,7 environ), un des quatre principaux piliers soutenant le Tiburium du Dôme. Ces piliers, ayant la hauteur de 24 m environ, ont été bâtis par tranches horizontales avec l' assemblage soigné de blocs en marbre de Candoglia à l' extérieur et remplis au moyen d' autres blocs en Serizzo et, quelquefois, en briques ou en pierres, constituant le noyau central moins résistant du pilier (Fig. 7).

La construction des modèles, chez ISMES, a été réalisée avec le plus grand soin, soit en ce qui concerne le choix des matériaux (marbre de Candoglia et granite de Serizzo) soit dans l' emploi des mortiers spéciaux, ciments et chaux, employés pour l' assemblage des blocs entre-eux. Comme dans la réalité, les joints horizontaux présentaient une légère rastrémation vers l' intérieur qui a eu un reflet remarquable sur l' apparition des premières fissures et des cassures à la surface extérieure des piliers.

Tous les essais ont été achevés au moyen de la grande machine verticale (presse Losenhausen de 2.000 t et de 6,5 m de portée utile) de ISMES.

Les premières expériences ont eu lieu sur un modèle de 6 mètres (Fig. 8), correspondant à la partie de la colonne qui a au réel (comprenant le chapiteau) une hauteur totale de 27 m. On a contrôlé l' effet de l' excentricité de la charge de compression axiale suivant les données à disposition (presque 10 cm au réel), et on a poussé l' essai jusqu' à la rupture finale. Avant cela on a constaté l' apparition graduelle des fissures et des détachements à la surface extérieure des blocs, en marbre de Candoglia, tout à fait semblables à ceux qui se présentaient sur les piliers du Dôme.

Après on a exécuté un grand nombre d' autres essais sur modèles de piliers, réduits à 2 mètres de hauteur, ayant surtout le but de contrôler soit l' effet (remarquable) de la composition des mortiers adoptés pour former les joints entre les blocs, soit l' efficacité des structures en acier conçues pour renforcer - en voie provisoire - les piliers endommagés.

Avec l' aide d' autres modèles on a voulu aussi vérifier la validité de la insertion de nouveaux blocs (toujours en marbre de Candoglia) en substitution des vieux plus ou moins fissurés (*), scellés avec un bon mortier en ciment.

(*) Obtenus avec surcharges préalables.



On doit remarquer que cette opération a été achevée avec le maintien de la charge correspondante au poids propre agissant sur le pilier. L'augmentation obtenue dans la valeur de la charge de rupture résulta, en général, liée au volume des blocs remplacés: avec une substitution (maximale) de l'ordre du 40% cette valeur a atteint 100% (Fig. 9).

Encore, on a essayé l'emploi d'une technique spéciale (étudiée par l'Ing. Ferrari) d'intervention globale pour la reconstruction totale des piliers centraux du Tiburium, avec le remplacement, commençant de bas en haut et par phases successives, de toutes les couches des blocs en marbre de Candoglia atteignant (à la fin) des résultats extraordinaires puisque l'on arrive à une charge de rupture 10 fois la valeur de la charge supportée normalement par les colonnes "in situ".

Enfin on a essayé la solution finale, actuellement en oeuvre, dont nous dirons après, avec l'emploi de deux modèles bâtis exactement les mêmes et soumis à essais de préfissuration simulant les conditions réelles des prototypes. Après, un des modèles a été tenu comme contrôle et l'autre, par contre, a été soumis à la substitution des blocs endommagés, toujours sous l'action de la charge normale, suivant la technique prévue par l'Ing. Ferrari. Ensuite les deux modèles ont été soumis aux essais à outrance poussés jusqu'à la rupture, et on a obtenu par comparaison la valeur de la marge de sécurité qu'on pourra prévoir lorsque l'oeuvre de reconstruction sera achevée.

3. METHODE D'INTERVENTION

Le but de l'opération consiste dans le déplacement en secteurs, en commençant de haut en bas, du gainage provisoire en béton armé (Fig. 10) et, en même temps, dans la consolidation statique des piliers en remplaçant les parties de marbre lézardées de la couronne circulaire, qui représentent presque le 60% de leur développement total en surface, avec d'autres éléments nouveaux, toujours en marbre, introduits de façon telle à résulter immédiatement collabourants avec la structure originale, c'est-à-dire en absence de déformations appréciables.

En 1975 il avait été projeté, approuvé et expérimenté (sur le modèle à échelle 1:4,7) un système d'intervention globale, qui prévoyait la substitution totale des piliers par trois phases d'intervention successives, en ce cas réalisées en commençant de bas en haut. Les résultats atteints par ce système spécial, comme l'on a déjà dit, ont été exceptionnels, mais - à cause de différentes raisons - ce projet de remarquable intérêt, même général, n'a pas été réalisé, et l'on a préféré un autre projet (celui aussi étudié par l'Ing. Ferrari), qui propose de nouveau la méthodologie déjà adoptée pour la restauration des seize piliers du transpet, de l'abside et la grande nef. Il s'agit d'interventions partielles soit pour extension que pour profondeur, plus ou moins vastes, au moyen desquelles on enlève les parties lézardées en les remplaçant (par un procédé spécial) avec d'autres éléments neufs, toujours en marbre de Candoglia, qui deviennent immédiatement éléments portants.

La différence opérationnelle des deux projets est représentée par le différent sens de l'exécution; de bas en haut dans le premier cas, s'agissant de substi

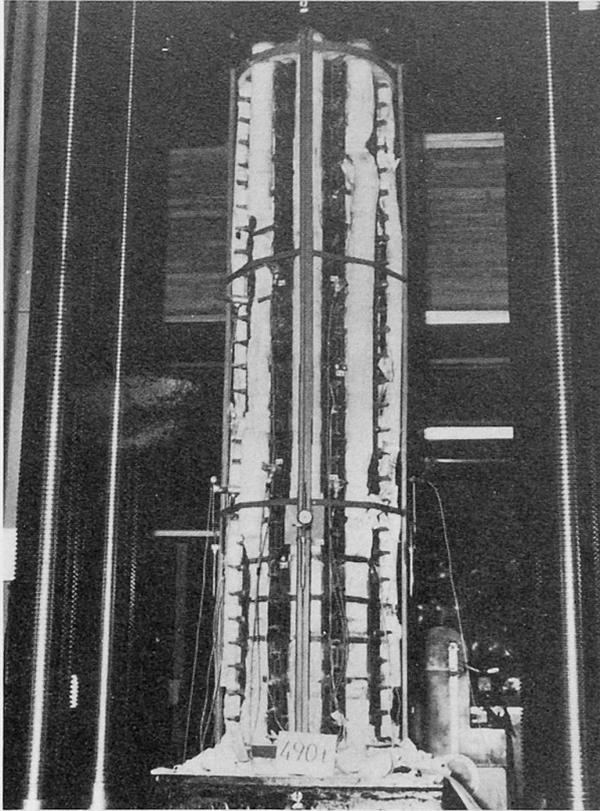


Fig. 9 Modèle de hauteur réduite (3 m) après la rupture. On voit l'appareillage de mesure.

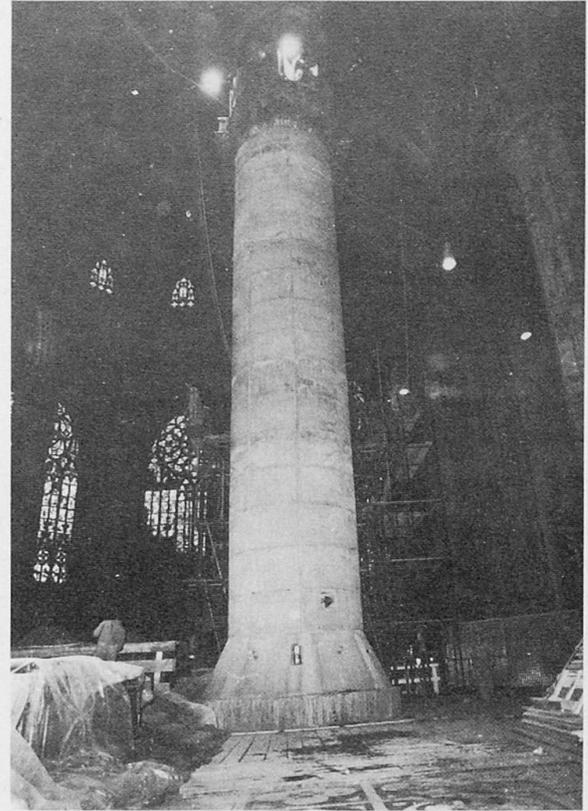


Fig. 10 Gainage provisoire en béton armé appliqué à un des piliers.

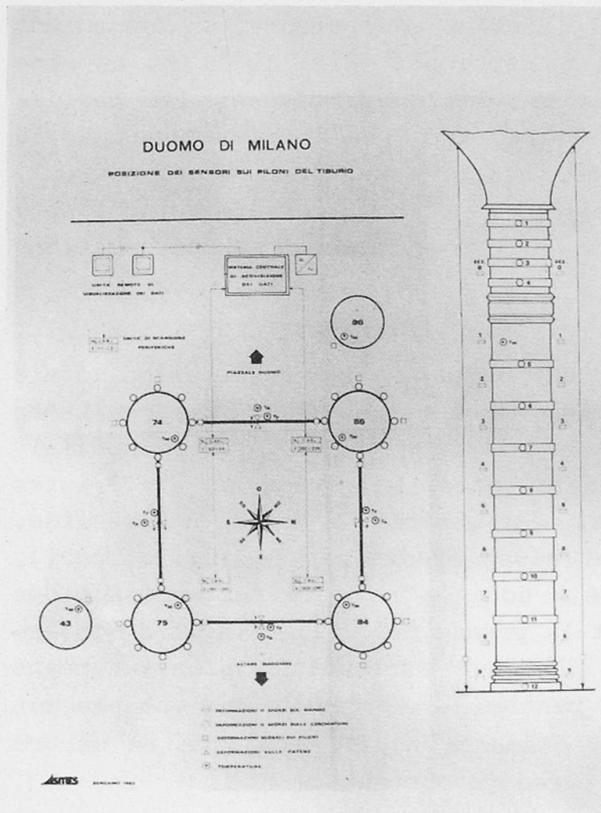


Fig. 11 Plan des instruments électriques appliqués à une des colonnes

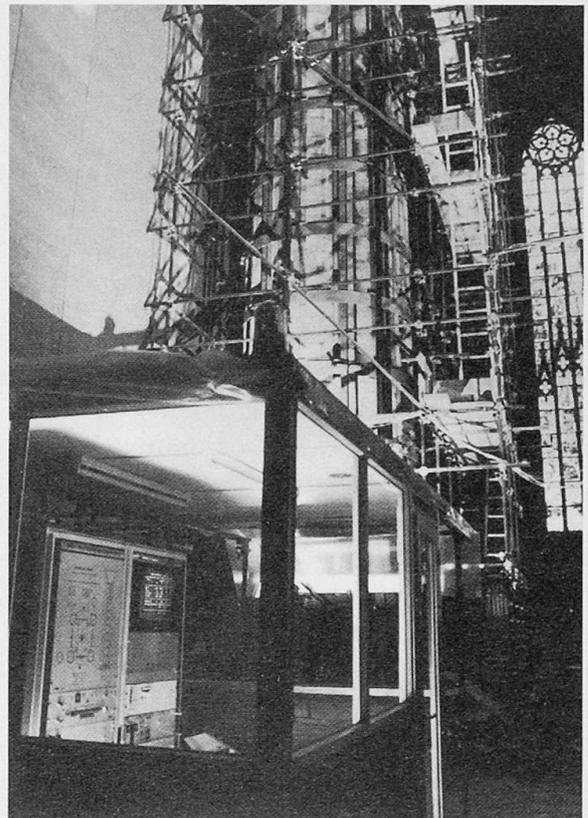


Fig. 12 Centrale automatique pour le contrôle continu et vision partielle du chantier

tution totale, exécutée par éléments verticaux; de haut en bas, dans le cas présent, s'agissant d'une intervention partielle, même si ça intéresse outre le 60% du développement total des piliers; en outre le gainage en béton armé, pour être actif comme étayage jusqu'à la fin des travaux, doit être enlevé par secteurs, en commençant de la partie supérieure du pilier. Pour cela la intervention de restauration statique prévoit, dans le cas en objet, un cerclage préliminaire métallique de sécurité autour du gainage, déjà en place, de façon d'en substituer sa fonction dès qu'il est compromis par les tailles, qui sont exécutées par éléments de m 2,50, à peu près, de hauteur et de m 0,50 de largeur.

Une fois enlevé par secteurs le gainage en béton armé, l'on fait la taille à sec par des couronnes "vidiam" refroidies par de l'air comprimé et, au même temps, par l'aspiration de la poussière des blocs de marbre lézardés et des parties internes composées, ainsi que l'on a déjà dit, de matériaux hétérogènes.

Ayant donc rectifié les plans soit horizontaux que verticaux des cavités ainsi obtenues, on applique une couche continue de deux millimètres de mortier de béton mélangé avec de la poudre de quartz et silice et l'on introduit dans les dites cavités, ainsi réalisées dans les piliers, des nouveaux éléments de marbre façonnés avec des logements soit radiaux que circulaires, par un forçage sur le dernier de ces nouveaux blocs de marbre, qui en pratique résultent dédoublés et taillés à coin (dans les deux parties) de façon à rendre le nouveau complexe structure portante ainsi que la structure originale, avec l'avantage de diminuer notamment les affaissements.

Pour le contrôle opératif pendant la restauration statique on a fait les suivantes mesures (Fig. 11):

- a) variation de la longueur globale de chaque pilier, du chapiteau au plinthe, par l'emploi d'un extensomètre micrométrique et par un extensomètre à variation d'inductance à lecture continue, centralisée et enregistrée;
- b) déformations locales dans les zones d'intervention par l'emploi d'un calibre extensométrique;
- c) déformations locales (et contraintes) sur le marbre, cerclages en fer, variations de longueur des chaînes et de la température (de l'air, du marbre et du fer) avec l'emploi des mesures continues centralisées (Fig. 12).

Les données obtenues jusqu'à présent ont été analysées avec soin et on a constaté la grande influence des effets thermiques sur les déformations locales, avec des écarts notables sur les contraintes prévues. Par contre les fléchissements et le affaissements ont été assez réduits et ils ont confirmé la validité du procédé appliqué.

4. CONCLUSIONS

Suivant le but de ce Colloque, les Auteurs ont essayé de donner aux Partici-



pants, intéressés aux aspects techniques de la restauration des grands monuments historiques, un aperçu de ce qu' on a exécuté pour sauver le Dôme de Milan, donnant en particulier quelques données sur l' application des modèles physiques et sur les méthodes poursuivies pour le renforcement des piliers soutenant le Tiburium du Dôme. Enfin on a brièvement décrit les buts des installations de contrôle employées pendant l' exécution des travaux, encore en cours et qu' on compte d' achever d' ici en 1985.