

SALVATORE DI PASQUALE

APPLICATION DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET DE LA TECHNOLOGIE A L'ANALYSE  
ET A LA CONSOLIDATION  
DES STRUCTURES ARCHITECTURALES

RAPPORT GENERAL

Avec cette relation je vise deux objectifs: faire le point des travaux présentés à cette section du congrès et tenter une panoramique sur l'état actuel des recherches théoriques et appliquées, concernant le problème de la consolidation statique dans les interventions de restaurations des monuments ou des centres historiques.

L'extension à ce dernier domaine semble aujourd'hui plus que jamais opportun pour une série de motifs, souvent tragiques, qui ont renvoyé l'intérêt des chercheurs et des préposés aux travaux sur des problématiques de caractère général, dans lesquels le monument, dans l'acception courante du terme, peut aussi ne pas être présent, pendant que vous avez tout un tissu urbain, modeste mais riche d'histoire, dégradé « fatissant » ou à la rigueur dévasté d'événements sismiques.

Cela mène à considérer des problèmes vers lesquels existe une impréparation générale, pour ce qui concerne les méthodes d'analyse, et par conséquent ce qui concerne les techniques d'intervention étant celles là, au moins en ligne théorique étroitement liées à l'analyse intense comme connaissance réelle du phénomène recherché; impréparation scientifique, technique et technologiquement avancées. Si on peut dire ainsi de l'ancienne pratique technologiquement avancées. Si ainsi on peut dire de l'ancienne pratique constructive liée à l'usage, des pierres, des briques et autres matériaux; ce n'est pas un cas, en effet; que dans nos universités les disciplines qui cons-

tituent le bagage courant du technicien ne donnaient pas de place, aucune à des théories et des techniques de construction en briques.

Acier et béton armé détiennent la première place absolue désormais à partir des premières décennies du siècle et rien ne laisse prévoir un changement de direction. Naturellement je ne parle pas des cas sensationnels, et surtout pour cela à tous les fameux, dans lesquels le simple projeteur a résolu brillamment le problème de consolider l'insigne monument confié à ses soins, ou avec des admirables entreprises techniques a redressé les murs, a modifié les temples, a refait vraiment en béton armé ou en acier, des structures et des parties des monuments écroulés; je parle d'une conscience de masse, d'un bagage minime de connaissance que chaque technicien devrait posséder pour affronter des problèmes d'une portée bien plus vaste: et les interventions dans les centres dévastés par les séismes en sont un exemple fondamental surtout pour l'extension et la gravité des dégâts produits.

De ce point de vue tout est encore à faire; et les recherches dans ce secteur sont encouragées et, planifiées et sont soutenues par des moyens financiers nécessaires à une expérimentation à grande échelle, de façon à pouvoir confronter les hypothèses théoriques, et les résultats déduits, avec le déroulement réel du phénomène enquête; l'enquête expérimentale trouve ici, plus que autre part, des significations précises: les nouvelles techniques d'intervention basées sur l'emploi de résines époxy et collantes; celles fondées sur l'insertion des micro-poteaux armés; celles plus variées qui visent à conférer à la masse de maçonnerie la capacité de résistance à la traction au moyen d'opportunes insertions, sont tous des procédés qui ont encore une précise base théorique, mais qui se configurent plutôt comme expédients techniques, opportuns à bloquer une situation de difficultés financières, mais pas tout à fait justifiables dans le domaine théorique. D'où la nécessité de flanquer à ces expérimentations « en échelle réelle » une enquête systématique qui vise à la création d'une théorie générale pour les structures de maçonnerie. Théorie qui ouvre en plusieurs parties en gestation, prête à bouger les premiers pas, mais pas encore complètement définie comme nous sommes habitués pour des structures en acier ou en béton armé.

C'est vrai d'autre part, que très souvent il n'est pas possible d'extraire à partir d'une oeuvre de maçonnerie « la structure » dans le sens conventionnel du terme pour qu'elle coïncide avec l'oeuvre elle même; c'est vrai que très souvent il n'est pas possible recourir à ces schématisations qui réduisent les structures à des schémas abstraits de lignes et de symboles qui en fixent les liens que faire avec des problèmes tridimensionaux dans lesquels toutes les dimensions sont comparables entre elles et aucune des trois n'est petite vis à vis des autres comme c'est demandé, par exemple,

dans la théorie des traves et des dalles. On ne peut non plus se taire sur cet autre aspect de la question, invraisemblablement important qui fait des structures de maçonnerie solides constituées de matériau hétérogène, bien résistante à la compression et peu ou rien à la traction, avec des plans de faiblesse en correspondance des joints si les mortiers sont peu résistants, ou avec des plans qui s'entrecoupent de résistance et de zone intermédiaire peu résistantes si les mortiers sont bons et si la pâte des briques n'en est moins.

Ce sont tous des aspects, ceux ci, qui contribuent à compliquer le problème et à le rendre difficilement abordable avec une théorie qui aie des ambitions de généralité; d'où les tentatives, dont je dirai diffusément plus tard, pour affronter des questions particulières vaguement semblables à des problèmes réels; d'où encore les interventions innombrables, exemplaires au point de vue technique, mais cependant privées d'une base théorique clairement définie.

D'autre part il est aussi possible lire comment à lieu de nos jours avec une vision diverse; puisqu'en effet il n'est pas possible attendre la réponse scientifiquement rigoureuse qui devrait être produite d'une théorie qui n'existe pas encore, c'est naturel que qui est appelé à intervenir sur le bâtiment en mauvais état soit-il monumental ou non, doive recourir aux solutions techniques et aux procédés d'intervention, déjà vérifiés ailleurs, ou transférés à partir de la technique des constructions en acier ou en béton armé au cas en examen et opportunement adaptés, qui lui permettent de résoudre rapidement et correctement le problème; je dirais que ce moyen de procéder trouve sa validité proprement dit dans l'histoire du construire, quand se reflète sur le fait que les théories qui expliquent les phénomènes structuraux n'ont jamais précédé le bâtiment mais en ont été engendrés.

C'est une intervention de consolidation statique, à peine comprise sur ses lignes essentielles, non justifiables complètement à la lumière des théories scientifiques, il ne me paraît pas dissemblable à partir de l'intervention qui a produit le même objet à restaurer, objet que nous ne sommes pas en mesure de justifier avec des considérations théoriques pour le seul fait qu'une théorie n'existe pas.

On comprend bien, donc, qu'il soit difficile de tracer une panoramique générale d'un paysage dont les contours sont à peine définis; les enquêtes sur le comportement des matériaux, les techniques d'intervention, les structures et leur interaction avec les terrains de fondations, les analyses diagnostiques et les thérapies fondées sur l'emploi des résines synthétiques, sont des aspects particuliers d'une multiplicité qui constitue la problématique générale du phénomène des ruptures. Cependant il me paraît possible d'ébaucher cette prospective, même si incomplète et certainement agrandissable, sou-

lignant certains thèmes qui apparaissent assez significatifs et dans lesquels il me paraît qu'ils puissent résumer les recherches qui dans les dernières années se sont effectuées dans ce secteur. Dans la suite j'exposerai ce thème selon une succession qui n'a pas d'autre logique que celle, présumée de donner un ordre au problème traité; j'extraierai donc quelques conclusions qui ne semblent pas étrangères aux contenus des chartes de restauration.

### 1. *Recherches sur les matériaux et sur les structures en maçonnerie.*

Les pierres, naturelles et artificielles, avec les structures qui ont origine avec ceux-là, constituent évidemment l'objet principal des recherches théoriques. Naturellement il s'agit des recherches qui ont pour objectif la définition des modèles physiques-mécaniques destinés à donner la raison du comportement par rapport aux agents externes ainsi intéressés, cela veut dire essentiellement des forces et des variations thermiques.

A ces recherches sont liées celles expérimentales sur des échantillons de matériaux, ou sur des modèles de structures, à l'échelle réelle, au moyen desquels on obtient des données essentielles pour le contrôle des théories élaborées.

Pour ce qui puisse apparaître permis de distinguer entre les matériaux, on relève que même l'élément constituant premier des structures, pierre ou brique que ce soit a une structure qui régularise le comportement; pour ce motif ici on ne fait pas de distinction entre deux arguments, qui se traitent parallèlement en pouvant transférer des recherches et des méthodes, spécifiquement individuelles d'une et à l'autre.

Les pierres, comme les terrains, ont peu, ou à la rigueur aucune capacité de résister aux efforts de tractions; et les structures de maçonnerie qui prennent origine des plaques ont en plus la complication du mortier, matériau avec des caractéristiques différentes, si ceci est, avec des doutes et des résistances à traction ou, en cas de son absence, l'assurance de ne pas pouvoir résister si son à des efforts de compression.

Même à vouloir faire abstraction à partir de la composition du matériau pour sa nature hétérogène et anisotropique une étude théorique du matériau de maçonnerie et des structures du mur, présente tels grades d'incertitude et d'aléatorieté à rendre illusoire les résultats atteints; les problèmes ne sont pas extrêmement complexes et les solutions qu'on peut obtenir ressentent toutes des inévitables hypothèses simplificatives qu'il faut introduire; pour ce motif, la formulation du problème doit prendre appui sur un schéma mécanique clair le plus adhérent possible à la réalité ou, de toute façon, commandé d'hypothèses simplificatives qui donnent bien à

des solutions dont le grade de sécurité soit indiscutable: et tel est, par exemple, l'hypothèse qui considère la résistance à traction nulle.

Naturellement le problème demeure non résolu de comment évaluer les caractéristiques mécaniques des murs ou structures plus ou moins exécutées correctement, de comment tenir compte des joints pas toujours faits respectant les règles d'art, de comment considérer le remplissage qui quelques fois est contenu entre des paramètres de construction de murs et ainsi de suite.

Ce sont des problèmes, ceux ci, probablement non solubles dans le domaine de fondation théorique d'une méthode d'analyse; lequel, néanmoins conditionné de pesantes hypothèses, semble cependant constituer un guide indispensable et un confort à ne pas renoncer pour qui doit concrètement opérer; et dans cette optique il me semble qu'on puisse encadrer les études récentes, qui vont s'exécuter sur le comportement des structures des murs.

La nécessité d'avoir une référence précise dans la diagnostic des cracks, est un préambule indispensable pour une intervention correcte de consolidation; et le repérage précis et universellement valide ne peut que dériver d'une formulation théorique correcte, qui tienne compte du comportement effectif des matériaux qui la constituent et de la façon dont ils ont été élaborés et mis en oeuvre, même si pour les motifs précédemment définis, il faut une grande prudence et une expérience notoire afin de répondre réellement au but.

De ce point de vue il est clair que l'analyse structurale, ainsi avancée pour les problèmes de l'ingénierie moderne, n'a pas laissé d'espace aux maçonneries; tant que cela ne peut tracer rapidement un profil de développement historique.

A partir du célèbre essai de C. A. Coulomb, qui date de 1773 et de l'élaboration successive et appliquée de Mery en 1840 sur les idées précédentes de Moseley et Navier, le problème de la statique des structures des murs devra attendre plus de cent ans avant d'être remis en question; et il s'agit, comme chacun le sait surtout de l'arc en maçonnerie.

Seulement autour des années cinquante de ce siècle, le problème est repris et posé avec une méthode plus appropriée les tentatives développées autour des années vingt pour adapter la théorie des structures élastiques au problème de l'arc en maçonnerie n'eurent pas beaucoup de suite pour manque implicite dans les hypothèses de base consistant dans le fait de considérer parfaitement la structure élastique sous la seule condition d'avoir une courbe de pressions entièrement contenue dans le noyau central d'inertie et du fait de retenir de toutes les façons les résultats valables même si le polygone funiculaire résultait contenu dans la forme de l'arc.

Le point faible de ces tentatives n'était, naturellement, pas tellement le

fait de considérer le matériau de maçonnerie élastique, ce qu'il est s'il est sollicité entre ses limites justes, mais de retenir effectives des solutions caractérisées de la courbe des pressions qui en quelque point de la structure résultent accident sur les sections en des points externes aux noyaux: en tel cas en effet la solution est seulement équilibrée mais pas congruente, ou bien il s'agit de solutions obtenues directement avec la statique des corps rigides.

Le détour des années cinquante est déterminé à partir de la disparition du calcul de rupture et de ses applications progressives à l'analyse structurale; les théorèmes de l'analyse limite, qui s'adaptent remarquablement à la détermination de la charge maximale des arcs en maçonnerie, semblent constituer la reprise logique d'un discours qui, commencé en plein moyen âge, traverse les contributions successives de Villard de Honnecourt, Leonardo, L. B. Alberti, Blondel, Borra, et tant d'autres, jusqu'au travail fondamental de C. A. Coulomb.

Si on excepte les études théoriques expérimentales de A. J. S. Pippard, E. Tronter, L. Chitty et R. J. Ashby, effectués autour de 1936-38, la première application du calcul à rupture des arcs dans les maçonneries est de 1952, est due à A. Kooharian, qui travaille dans le milieu de D. C. Drucker et W. Prager; ces derniers, reprenant une idée de Coulomb, proposeront un critère de rupture qui aujourd'hui est utilisé dans l'analyse limite de la structure de maçonnerie et qui est dit, point de Coulomb, Prager et Drucker; quatorze ans après J. Heymna publie un essai sur la statique des cathédrales gothiques, dont suivra une série de notes dans lesquelles, dans les recherches minutieuses théoriques, correspondent des applications concrètes d'intérêt méthodologique notoire à partir de la restauration des églises de Ely, et de la consolidation de certains ponts de Telford. Les notes scientifiques de J. Heyman, qui avait publié une édition critique de l'essai de Coulomb précédemment en 1972 constituent aujourd'hui la référence précise pour qui étudie la statique des maçonneries et sont le point logique de départ, comme l'ont montré récemment V. Franciosi et R. K. Livesley, quand on veut par exemple tenir compte du frottement dans le calcul de rupture des arcs.

Dans cette direction de recherche on signale aussi les contributions de Ch. Massonnet et M. Save dont un chapitre de leur traité du problème de l'arc dans la maçonnerie; l'étude de H. Joway sur les applications du calcul à rupture aux cathédrales gothiques mérite une signalisation particulière.

L'analyse des voûtes gothiques avec les méthodes classiques de la théorie structurale a été développée au contraire par le même J. Heyman et I. Segger

dans une thèse de doctorat à Aachen; dans cette étude on a appliqué avec succès la théorie des voûtes minces — codifiée vers 1930 à partir des études de Pücher, Finstienwalder et Flügge — à l'étude des ensembles de voûtes qui couvrent certaines des plus fameuses cathédrales gothiques de l'Europe du nord, Cologne, Liège, Paris, Reims.

L'autre grande direction de recherche, qui naît pratiquement dans les mêmes années, prend comme objectif la formulation du problème de l'équilibre d'un moyen continu homogène ou non, constitué de parties élémentaires réciproquement unies en mesure d'expliquer des réactions dont le signe est déterminé par le type de lien (et ici on entrevoit le bloc de maçonnerie, qui ne réagit pas à la traction); il s'agit essentiellement du problème de base dans lequel la forme de la structure n'est pas précisée; on ajoute dans ce cas aux classiques équations de l'élasticité des inéquations qui en limitent la validité aux régions spatiales, dans lesquelles les liens puissent expliquer leurs réactions; ces recherches extrêmement complexes ont substantiellement pour but la définition de modèles de comportement de la structure et la mise au point de techniques spécifiques de computer.

La complexité du problème, même si schématisé et réduit à l'étude d'un modèle, consiste dans le fait que sa formulation n'est pas linéaire dans le sens que tous les éléments qui font partie de la structure ne sont pas effectivement engagés à partir des forces externes et, naturellement, on ne sait pas quels sont les éléments actifs.

Ici il vaut peut-être la peine d'ajouter quelque mot pour éclaircir la signification du problème; une structure de maçonnerie déterminée dans sa forme dans ses liens et dans ses actions externes peut être vue, par exemple, comme problème d'équilibre de ses parties constituantes (les pierres) et de congruence de leur déformation.

Le fait que les parties constituantes soient simplement en contact entre elles, par exemple sans mortier ou avec du mortier peu résistant, implique, dans la version analytique du problème, l'ignorance des surfaces se transmettent sur lesquelles le contact se produit et à travers lesquelles les actions et les réactions.

Cela veut dire que dans un certain sens que la structure qui correspond à un système de charge donné n'est pas celle définie à partir de ses formes extérieures, mais inconnu et dépendant des charges. Et c'est celle-ci l'essence du problème des structures de maçonnerie: la non correspondance de la structure apparente avec la structure résistante.

Dans le langage conventionnel des théories des structures le problème des maçonneries ainsi posé devient ainsi un problème d'équilibre de solides à liens unilatéraux ou un problème de contact; et encore une fois, une

première approximation peut être fournie à partir de l'analyse élastoplastique dans laquelle les travaux de W. Prager, G. Koiter et J. Oden sont à la première place.

Naturellement, la non linéarité du problème conduit à formuler des algorithmes résolutoires qui s'appuient sur des techniques spécifiques de computer, qui, on ne peut même plus rappeler ici. Il suffira seulement de rappeler le fait qu'il s'agit toujours de méthodes itératives élaborées sur la méthode classique de Newton-Raphson.

Une autre prise de contact au problème ainsi formulé est donnée à puter, qu'on ne peut même plus rappeler ici. Il suffira seulement de tion (celles qui fixent le signe des tensions internes) variables dont les fonctions énergétiques sont associées à d'opportunes conditions de liens sur les tensions; il convient de rappeler que à la différence des problèmes classiques de l'ingénierie structurale dans lesquels le fonctionnement énergétique est représenté par l'énergie potentielle totale, ici est plus convenable le fonctionnel de l'énergie complémentaire, notamment exprimé en terme de stress, sur lequel les conditions sont immédiatement données (et en cela on suit le chemin indiqué par A. Haar et T. V. Karman pour l'analyse des corps plastiques et, précisément, des moyens granulaires); les travaux récents de G. Majer et son école et de G. et M. Romano sont notoires dans ce domaine.

On signale encore les travaux de R. Frisch-Fay, pour l'intérêt qu'ils ont suscité sur la stabilité des colonnes en maçonneries, thème sur lequel G. Augusti s'était déjà appliqué; et en conclusion, pour les possibles changements applicatifs, le volumineux travail théorique expérimental de R.L. Barnett et P.C. Hermann sur la précompression des traves composées des claveaux disjoints.

Personnellement je trouve que le problème de structure de maçonnerie peut être encadré dans une vision plus simple, et peut être aussi plus générale, si on fait recours à la théorie des états de coaction, théorie née autour des premières années de ce siècle, et base théorique selon la vision de G. Colonnetti, de la théorie de la plasticité. Dans ce domaine il n'est même pas possible de souligner les notions fondamentales; je peux seulement rappeler le fait qu'elle est basée sur l'introduction de distorsions à l'intérieur de la structure de maçonnerie, dont le but est la création des états de coaction qui la libèrent des tensions de tractions qu'elle ne peut pas supporter; dans un certain sens cette théorie est très semblable à celle de la précompression avec la seule différence que ici les distorsions sont fausses, pas réelles, et correspondent exactement aux fractures et aux lignes selon lesquelles elles s'instaurent dans la maçonnerie; je n'ai même pas signalé

le fait que ces méthodes, quand elles ne sont pas liées à des éléments structurels monodimensionnels, impliquent, le recours aux techniques de résolutions numériques du continu à travers la méthode des éléments finis; méthode récemment apparue dans la littérature technique et courante. J'ai donné une première version dans le congrès récent de la IASS de 1979 à Madrid traitant de la stabilité de la coupole de Santa Maria del Fiore, version élaborée en séminaire que j'ai eu l'honneur de tenir à l'école de perfectionnement en restauration des monuments de l'université de Naples.

A ces recherches de nature théorique il faut ajouter, celles expérimentales affrontées pour la première fois par R. Mark en 1970 sur des modèles de cathédrales gothiques réalisées aussi avec des techniques photoélastiques; et celles plus récentes effectuées à la ISMES sur le Dôme de Milan pour avoir une référence précise dans les opérations de consolidation.

## 2. Les techniques d'intervention structurales.

Si d'un côté il a été assez facile de tracer une ligne d'évolution des points de vue modernes dans le domaine de l'analyse structurale des maçonneries, il n'est pas aussi facile de tracer une ligne d'évolution des techniques d'intervention; et cela pour des raisons que tout le monde peut comprendre et qui peuvent être résumées dans la constatation que s'il est permis et souhaitable que des groupes de spécialistes donnent leur attention aux problèmes théoriques, et souvent pendant très long temps, il n'est pas toujours permis d'attendre une réponse théorique à une question déterminée avant de déterminer le type d'intervention. Je dirais au contraire, et ici toute l'histoire de l'architecture me donne raison, que le procédé théorique justificatif d'une opération architecturale déterminée est toujours postérieur à l'opération même. En d'autres termes, par exemple, personne n'a jamais pensé fonder une méthode de calcul pour les tensostructures avant que celles-ci ne soient construites. Il me semble d'une manière analogue que aujourd'hui seulement on peut affirmer face à la demande massive d'intervention de consolidation et de restauration des vieux édifices et monuments, les milieux scientifiques, ceux dans lesquels la science est élaborée, pour être clair, aient commencé à montrer quelque intérêt pour ces thèmes. Puisque d'autre part les restaurations et les consolidations se sont toujours faites, probablement dans toutes les époques (même sans les chartes de restauration...) et dans tous les lieux du monde, il semble clair que les techniques relatives se soient développées et perfectionnées avec le temps, en dehors d'une recherche de base, qu'on définit scientifique et ayant des objectifs généraux. Il ne me semble même pas qu'on puisse se taire sur le fait

que le rapport ainsi instauré entre la science et la technique soit correct; on définit science de la restauration même tout l'appareil technique qui en permet l'expression et la réalisation en dehors des discours et paroles, belles quand on veut, mais toujours paroles: la subdivision ici établie est seulement utile à l'exposition sommaire d'une matière plus complexe dont les différents aspects, dans la problématique des cas concrets, sont difficilement séparables.

Certainement le problème de l'individuation des causes de rupture prend un caractère primordial envers les autres puisque seulement à partir d'une correcte interprétation des causes, d'où devrait dériver comme logique conséquence le cadre fissuratif, il est possible souligner le type et les modalités d'intervention. Ce n'est pas le moment pour discuter en détail du processus, entre autre très souvent subjectif, qui permet de remonter à partir de la phénoménologie de la rupture aux causes qui l'ont produit et par conséquent ont modalités opératives d'intervention.

Les phénomènes de subsidance, le vieillissement des matériaux, les vibrations produites par le trafic, les altérations physico-chimiques, les processus d'affaissement, l'agression de microorganismes, les défauts de protection, les variations thermiques, sont seulement certains facteurs qui peuvent produire la crise des structures architecturales ou de leur parties, posant ainsi, les prémices pour l'intervention de la restauration; et les méthodes d'analyse sont aussi nombreuses et spécifiques. Et ceci demande la mise en action des procédés fondés sur l'utilisation qui part de la mesure du mouvement des nappes phréatiques, des accélérations, de la décadence des caractéristiques mécaniques, des variations thermiques à l'intérieur des masses de maçonnerie. En limitant cette liste aux techniques d'interventions sur les structures, quand il ne s'agit pas de substitution d'entières parties lésionnées, on peut relever que presque la totalité des interventions effectuées ces dernières années est basée sur l'utilisation de deux systèmes, celui du renforcement de la maçonnerie lésionnée au moyen de micropoteaux de béton armé avec addition de résine spéciale et celui du renfort moyennant l'introduction d'ossatures portantes proprement dites qui ont pour but d'alléger la fonction statique des maçonneries endommagées.

On ajoute à celui ci le système de la précompression, déjà heureusement appliqué en 1954 par R. Morandi dans la consolidation des maçonneries de l'Arena de Verona et puis repris, avec la technique des micropoteaux, par J. Heyman pour la cathédrale d'Ely.

Les avantages et les inconvénients de ces systèmes, les motifs qui peuvent faire choisir l'un ou l'autre, conduisent à mon avis au problème central de la restauration statique des édifices monumentaux: et c'est là

le problème qui devrait être débattu en ce domaine, parce que les papiers « de la restauration », auxquels sans doute ICOMOS peut contribuer, laisse souvent trop d'espace à des interprétations subjectives et quelquefois contradictoires.

On n'a pas encore éclairci, en effet, dans quelle mesure l'intervention statique devait substituer les parties lésionnées ou simplement intégrer ces parties qui ne sont plus à même d'assumer totalement leur fonction statique. Dans cette perspective, on aborde, entre autre, le problème important de la conservation du patrimoine historique et de son environnement, situé dans des régions sur lesquelles pèse le risque sismique; et l'autre problème, encore plus urgent, de donner aux édifices déjà endommagés par les séismes cependant pas complètement détruits, mais seulement partiellement endommagés, les aides nécessaires et les relatives ressources structurales. Qu'on doive intervenir sur ces édifices à travers l'introduction de systèmes structuraux capables d'absorber les actions horizontales, il n'y a pas de doute; que ces actions doivent être ramenées au sol, est également évident; que le solfifi, et tout le système de fondation doit être soigneusement analysé et renforcé, est encore certain. Mais il n'est pas toujours clair comment ces opérations doivent être faites, sur les limites au delà desquelles il n'est pas permis d'aller pour éviter que le seul monument ou le tissu historique entier qui le contient devienne autre de celui qu'il était. Comme la reconstruction des grandes villes Européennes dévastées par la guerre crée beaucoup de doute avec des protestations pas encore terminées, exemple Coventry et Varsovie. Mais peut-être c'est celui-ci le vrai caractère de la restauration; être une discipline en évolution continue ouverte, d'un côté, aux apports continus de la science et de la technique, de l'autre côté fermé aux théories artistiques dominantes.

D'autre part on se rend compte de comment il est difficile d'établir une limite au delà de laquelle l'opération restauration perd sa propre signification qu'offre aujourd'hui la technique.

Je ne parle pas naturellement des techniques traditionnelles artisanales, je dirai, avec lesquelles on intervenait en substituant les parties fracturées et les parties contigües avec des parties nouvelles de matériaux différents selon une certaine vision critique de la restauration, de façon à rendre l'intervention visible; je parle des nouvelles techniques que je résume ici en quatre types différents: les micropoteaux, l'imbibation totale de résine synthétique, l'insertion d'une ossature portante en acier ou en béton armé, la précompression.

Avec les micropoteaux les fonctions portantes de la maçonnerie sont intégrées par une grille d'éléments résistants, inclinés de façon variable et

de différents diamètres, généralement de l'ordre des centimètres, avec le but de créer une sorte de squelette résistant répandu et collaborant avec la maçonnerie avec l'imbibation — sous vide selon de très récentes recherches expérimentales — de toute la masse de maçonnerie ou des seules parties contigües aux lignes de fractures, à travers des substances chimiques (vaguement définies collantes, et avec des noms qui répondent aux sigles et brevets industriels) avec le but de solidifier les parties fracturées et de donner une meilleure connection à la masse de maçonnerie en la dotant aussi d'une bonne résistance à traction.

Avec l'insertion d'une vraie et propre structure portante, autosuffisante, les fonctions statiques de la maçonnerie sont complètement annulées.

Avec l'insertion des cables de précompression d'un diamètre de quelques millimètres si diffusés ou de quelque centimètre si concentrés, on atteint le but de donner à la structure de maçonnerie une aide efficace contre les forces horizontales, et lui confère une meilleure stabilité.

L'examen de ces quatre solutions possibles éclaircit la différence entre les résultats qui sont obtenus; bien entendu des résultats ici seulement formels puisqu'il est à retenir que sur le point de vue statique tous correspondent au but; ni le coût de chacun d'eux a grande importance, aussi parce que souvent on a des compétitivités notoires.

Résultats formels que chacun pourra imaginer entrain de placer le mur pris en prétexte pour le discours dans le contexte du monument ou du vieil édifice qui rappelle mieux, par expérience directe ou par connaissance simple: il y a des différences et en sont mêmes évidentes.

Par ici la manière différente de résoudre les problèmes, la manière différente de comprendre la signification du terme restauration; manières sur lesquelles certains s'interrogent et formulent des réponses, différentes souvent pleines de contradictions; et entre celles ci on choisit la solution qui répond le mieux au but; qui ensuite très souvent se représente en avantage économique pour la mineure dépense qu'elle comporte.

Je suis ainsi poussé à donner quelque mot de conclusion avant de passer à l'illustration des notes présentées à ce congrès, sur le problème du rapport coûts-bénéfices, du rapport entre le coût de l'opération de consolidation et le bénéfice qui se déduit de cela; dans la pratique ingénieurique de ces dernières années est établi l'usage d'évaluer la vie nominale de la construction et sa durée économique. C'est évident que dans le cas d'une oeuvre monumentale le rapport sécurité-durabilité ou bien la manière de se confier à l'oeuvre restaurée à des paramètres de valuation diverse de celles d'une nouvelle construction. Comme a observé E. Giangreco, l'absence d'un caractère répétitif dans les opérations de restauration a une forte incidence sur

les coûts et, parfois, conditionne l'emploi des techniques plus appropriées du point de vue du résultat formel.

Les quatre techniques d'intervention premièrement hypothésées trouvent confrontation concrète dans trois des mémoires présentées à ce congrès.

La note envoyée par l'Arq. J. O. Lajous illustre, avec des applications concrètes, la technique des injections dans les structures lésionées par les séismes avec l'objectif de constituer un système structural analogue à celui selon lequel il fût projeté; décrit aussi un système de « poteaux de contrôle » utilisé pour la consolidation des fondations avec la possibilité, moyennant précautions opportunes, de varier leur portée et d'absorber des affaissements différentiels du sol de manière à rétablir les niveaux originaires en cas de affaissement.

Dans la dernière partie de la note est enfin décrite la technique d'intervention préventive sur des édifices hauts, le plus souvent des tours portant des cloches, situées dans des zones sismiques; il s'agit de la technique de cables post-tendus qui, opportunément inserés dans la masse de la maçonnerie, et bloqués supérieurement et inférieurement aux cadres en béton armé, confèrent à la tour des capacités de résistance notoires aux sollicitations de flexion, derivant du séisme. Il me semble devoir signaler, surtout pour qu'on approfondisse pendant la discussion, une préoccupation que l'auteur de la note exprime, et c'est-à-dire « de considérer inadéquat le processus de consolidation du monument moyennant l'usage des structures nouvelles en béton armé qui auraient prétendu le faire travailler à la traction; pour cela on recommande d'effectuer seulement des interventions partielles de restauration qui n'altèrent pas la conception statique originale du monument ».

J'ai déjà rappelé précédemment ce problème et je retiens qu'il soit ultérieurement approfondi.

Une autre des notes présentées au congrès, celle du Prof. A. de Meyer, illustre avec grande rigueur, et avec le goût du chroniqueur, la consolidation des grandes colonnes de la cathédrale d'Anvers. A la description claire des phases de l'intervention sur les colonnes lésionées, intervention effectuée colonne par colonne et pierre par pierre, est prémise l'analyse comparative des critères qui ont orienté le choix de la solution, à base d'injections de résines effectuées dans le noyau interne des colonnes, réalisé avec des briques, afin d'obtenir une résistance meilleure et une plus grande déformabilité. Cela sert à construire, selon l'auteur, une réserve contre des facteurs imprévoyants.

Les conclusions de la note méritent d'être soulignées pour la contri-

bution qu'elles peuvent fournir à la discussion générale; en particulier, comme dans le cas précédant, la préoccupation de l'Auteur face à l'utilisation indiscriminée des structures en béton armé ou en acier pour renforcer les oeuvres de maçonneries des monuments antiques, structures qui généralement résultent beaucoup plus rigides et peu flexibles: « Il a aussi la tendance à exiger les mêmes marges de sécurité comme dans les constructions modernes. Justement parce qu'on ne connaît pas les caractéristiques de la structure ancienne ou la répartition des contraintes, on renforce encore plus que normal et on arrive à des exigences et des installations exagérés ».

La note présentée par l'Arch. F. Leblanc illustre avec clarté et simplicité une expérience de consolidation de voûtes en maçonnerie de briques moyennant injection de résines époxydes sous pression; aux brèves notes historiques concernant la construction fait suite une description détaillée de différentes phases de l'opération et du procédé technologique employé avec référence particulière à l'analyse critique des valeurs des pressions auxquelles l'injection doit être effectuée pour obtenir des meilleurs effets; le compte-rendu final est intéressant dans lequel aux quantités de matériaux employés, de temps, à la masse de maçonnerie consolidée, correspond un coût unitaire pas élevé. Ces considérations font penser au futur possible de ces nouvelles techniques, non encore diffusées comme elles mériteraient, mais certainement compétitives au point de vue économique.

La note représentée par J.L. Toupin illustre des techniques d'intervention différentes pour les grandes charpentes en bois des édifices de l'aire française; trois méthodes sont ainsi examinées en détails, c'est-à-dire démontage et reconstruction, stabilisation avec des structures complémentaires, régénération des parties défectueuses au moyen de résines et de fibres de verre.

A l'exposition de cas particulièrement significatifs où ces trois techniques ont été utilisées, exploitation toujours critique et comparée, suivent les conditions qui sont certainement dignes d'intérêt. Peut être plus que dans le cas des maçonneries l'intervention sur les structures en bois demande un préparation, compétence professionnelle de la part de qui projette l'oeuvre de restauration et surtout grande aptitude artisanale de la part de qui matériellement exécute le travail. Dans ce sens l'Auteur soutient que les nouvelles techniques fondées sur l'utilisation des fibres de verre et résines peuvent être de grande aide dans le métier de charpentier; on fait naturellement sauf le principe que toutes les parties saines de l'ossature doivent être réutilisées.

La note du Prof. B.H. Feilden et de l'Arch. A. Alva a pour objet une analyse globale du comportement des monuments dans les zones sismiques,

analyse traitée à partir des expériences accumulées par l'ICCROM dans les tremblements de terre du Guatemala, du Friuli et de Montenegro. La complexité, la généralité et la difficulté des thèmes traités ne permettent aucune tentative de résumé, il me semble de pouvoir affirmer que la grande et reconnue expérience du Prof. Feilden trouve ici une autre confirmation.

La note présentée par les Arch. G. Alessandri, E. Baroni et B. Leggeri donne compte d'une série d'expériences de laboratoire visant à évaluer les augmentations de résistance mécanique registrable dans les matériaux qui composent selon la règle la maçonnerie, c'est-à-dire briques, mortier et conglomérat de mortier et briques; les épreuves tant naturelles ou imprégnés sous vide avec les résines synthétiques. Les résultats font prévoir, selon les auteurs, des emplois structuraux intéressants de cette nouvelle technique de traitement des matériaux non réagissant à la traction.

La note des Arch. C. Blasi et M. Pecchioli concerne l'analyse expérimentale moyennant des techniques photoélastiques des sollicitations en structures de maçonneries élémentaires comme des piliers, architraves, arcs. A la différence des recherches conduites par R. Mark, ici les modèles sont réalisés avec des claveaux disjoints, à contact simple mutuel, et de ce fait pas en mesure de transmettre des efforts de traction. Les résultats obtenus apparaissent de grande considération; il faut seulement, à mon avis, ajouter à la recherche expérimentale des évaluations de caractère théorique qui donnent pleine raison des résultats mêmes.

La dernière note, rédigée par l'arch. C. A. Anselmi et par l'ing. L. Fino traite le problème de l'analyse de tension dans les maçonneries à travers l'individuation d'un modèle opportun mathématique; les deux auteurs pour aborder les difficultés computationnelles non insurmontables proposent un modèle réticulaire qui ne semble pas très proche à la maçonnerie qui voudrait se référer; il faudrait une discussion approfondie pour évaluer avec la précision maximum le poids au bout du résultat numérique des hypothèses assumées.

Les notes envoyées par B. Hoberg, M. Kairamo, B. M. Johnson et J. Stewart concernent des arguments non étroitement liés aux problèmes structuraux; cependant les thématiques traitées provoquent des intérêts qui méritent une discussion plus qu'approfondie. En particulier je dois signaler le problème soulevé par B. M. Johnson sur la climatisation des édifices monumentaux en relation à la destination d'utilisation; je dois aussi signaler les thématiques discutées par J. Stewart pour les implications que celles-ci ont avec la variation de la résistance mécanique, les matériaux manifestent en conséquence de leur traitement superficiel ou de profondeur.



Les notes présentées ne sont pas nombreuses, mais cependant avec leurs contenus il me semble qu'elles réussissent à couvrir presque toute la gamme des intérêts qui peuvent se reconnaître sous le titre « structure ».

En méditant sur leurs contenus on peut ébaucher une conclusion évidente, et c'est-à-dire que la vasteté même de la matière implique des divisions précises en ceux qui s'occupent des problèmes de base, ceux qui travaillent expérimentalement et ceux qui au contraire opèrent dans le concret utilisant des techniques dont la valeur est seulement dans la rationalité et dans l'efficacité du résultat atteint, ce qui n'est peu, même si reporté à une manque de critères généraux scientifiquement acceptés. Tout ceci porte à considérer le problème de la formation professionnelle des jeunes qui s'approchent aux thématiques structurales du problème de restauration et à reconnaître la nécessité absolue de relier la jeune association dont nous célébrons la VI<sup>e</sup> assemblée avec les autres institutions internationales qui désormais opèrent dans le domaine de l'ingénierie structurale et de la mécanique théorique et appliquée depuis plusieurs années, c'est la recommandation que tous ensemble devrions formuler à la conclusion de nos travaux.

SALVATORE DI PASQUALE

PRACTICAL APPLICATIONS OF SCIENTIFIC RESEARCH  
AND TECHNOLOGY IN THE ANALYSIS  
OF ARCHITECTURAL WORKS  
AND THEIR CONSOLIDATION

GENERAL REPORT

In the present report I wish to achieve two aims: the first is to give an account of the papers presented at this Congress Section; the second is to attempt a comprehensive survey of the current theoretical and applied researches, concerning structural restoration of buildings or ancient cities.

It is fairly advisable nowadays to spread our interest to the latter topic; in fact, this is suggested by many — at times tragic — reasons which lead the researchers to a wide range of design problems. Here, the building itself — in the accepted meaning of the word — may not to be the main object of the problem. On the other hand, a detailed and very interesting urban pattern must be taken into account, and the restoration works are to be faced with several types of structural damage, or even of seismic failures.

No doubt there is a general lack of scientific and experimental knowledge in this field, both for analytical methods and for the restoration techniques, as these are closely related to the analytical investigations of the given phenomena.

Such scientific gap, together with the absence of proper and suitable techniques, is probably due to the neglect — at least in technologically advanced countries — of the old building practice, by use of stones, bricks and other poor materials.

Perhaps, this is the reason why the masonry building techniques and theories are not included in the course of study of our universities. Since the first decades of this century, steel and reinforced concrete are the main,