

结构计算和其在智利的参考

Structural Calculation and Chilean References

撰文 Tomás Guendelman Bedrack

从过去50年间技术的飞速进步来看，一个最具相关性的结果是：在对广泛问题的分析和设计过程中，简化、限制方面取得了进步，而安全因素则在降低。但是，这可以归结为人类实用主义（只关注最新进步的负面因素）的结果。回顾智利所走过的路程，这并不是一个怀旧行为，而是为下一步的飞速发展做好准备。

在结构计算的分析方法及相关数学模型的领域，早期被世界上最富盛名的一些人物所主导，他们缺乏“精确”的技术，只是根据自己非凡的直觉或数学才能提出所谓的方法。这些方法一直延用到20世纪50年代，即数字计算进入学术和专业领域之时。多年以前提出的方程现在得以证明，从而再次流行起来，其中产生了用于分析动力问题（包括地震作用）的矩阵方法，而且这些方法几乎是瞬间传遍了整个世界。

结构计算是值得我们回顾历史、欣赏过去非凡智慧的一个知识领域，那时的数字支持工具还非常有限，但工程师就是凭着对结构的深入理解和多年的经验，完成了一个又一个令人惊诧的工程。例如，对圣地亚哥市内马波丘河（Mapocho River）上洛雷托（Loreto）桥的杰出结构分析，该桥在20世纪80年代被向东移动了100多m。工程师通过使用矩阵技术建立了包含300多个未知数的数学模型，达到了20世纪初的设计精确度。

结构形式的分析是根据建筑结构工程材料的特性来确定压力平衡、形变与位移间的几何关系，以及压力与形变间的关系方程式的。这三组方程式足以完整地诠释结构分析问题，而该问题在20世纪50年代中期以前，还没有得到确切的求解。为了克服难题，人们想出了各种方法，其中广为流传的有入口法、层间刚度法和基部刚度法（图1~3）。

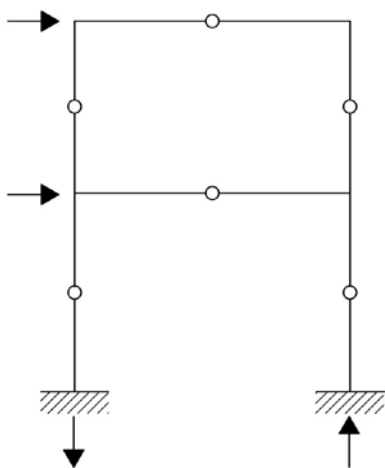


图1 入口法

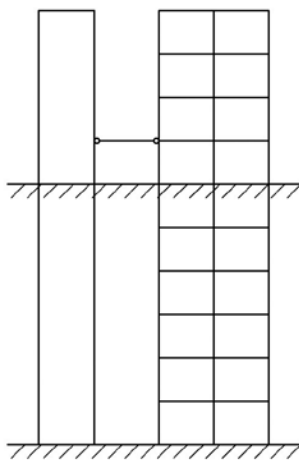


图2 层间刚度法

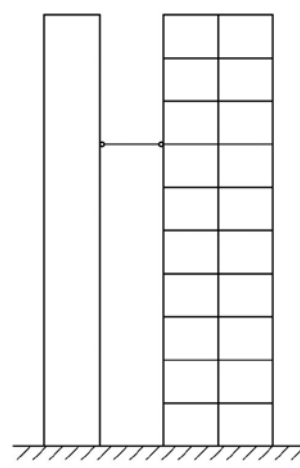


图3 基部刚度法

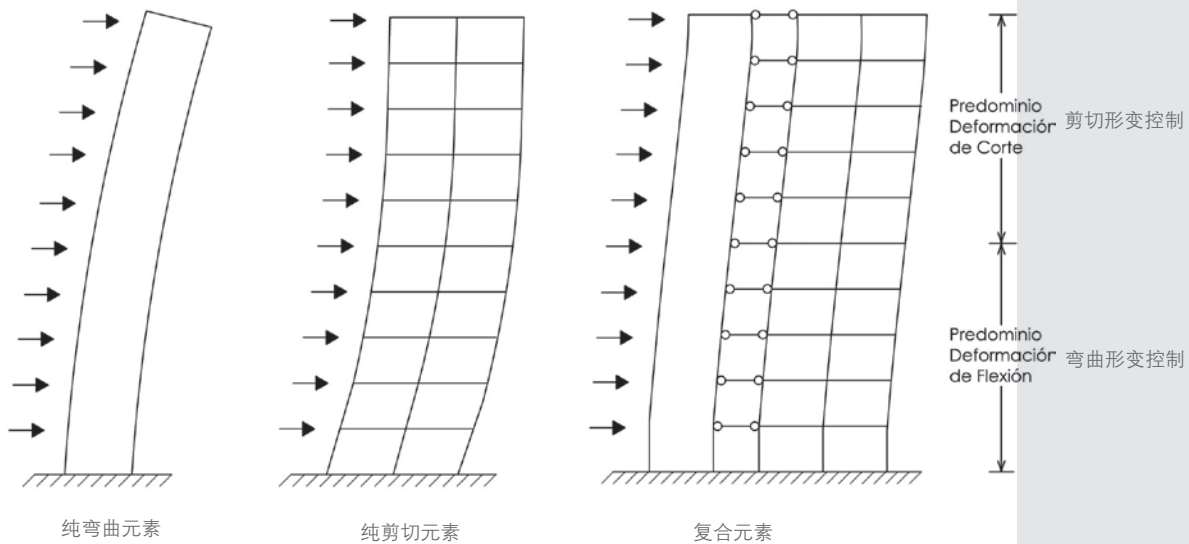


图4 连续模型

尽管这些方法过于简单，但确实已经使用多年。在实际应用过程中，除非使用者能够合理估计不存在弯曲的点并将支撑物精确地放置在相应的位置，否则入口法将难以解决产生的相关问题。层间刚度或基部刚度法仅在施加的负荷层面使位移相等，并假定较低楼层或底层是分别内置的情况下才会奏效。以上的矛盾将导致结构构件的受力分布不均，从而产生安全问题。为了解决这些冲突，在 20 世纪上半叶存在诸多技术限制的情况下，Rossman、Coull、Albiges 和 Goulet 等人率先开发了“连续模型”，假定建筑物由两个杆组成，通过不可变形的连杆顺次连接。其中一个杆仅产生弯曲变形，而另一个则只有剪切变形。在解决数学问题时，假定全部负荷分布在两个杆之间，以便在两个杆上产生相同的反作用力。如果每个杆的机械和几何特性在高度上为常量，或者应用其他计算方法求得，那么通过此方法得出的微分方程将具有明确的解（图 4）。连续模型非常成功，但仅适用于非常规则的结构，而这样的建筑并不普遍。这一缺陷在专业应用中由迭代形式进行解决和替代，此形式称之为“松弛法”，其中的交叉方法最为著名。

20世纪70年代中期，随着信息技术的引进，Joaquin Monge 工程师发现了在建筑物初步设计阶段模型的高效能力，并发展了人们之前弃用的连续模型。他的研究成果在许多技术刊物中均有介绍，并且直到近25年才由新兴的商业软件包所替代。

结构计算模型的建立不只是以方法或分析模型为核心的，还包括对地震破坏力的估算，以及对杆的机械和几何特性的评估。例如，用嵌在建筑基层的等效杆来代表建筑物，用一组静态侧向力来施加压力（图 5）。

由于地震产生的是惯性力，因此将高空处的加速度法则作为预设条件是非常重要的。自20世纪初至40年代，人们一直假定横向加速度（惯性力的激发源）在高度上是一致的，约为重力加速度的12%。在随后的10年间，出现了倒三角加速度分布（图 6），后来对其进行优化得出了结构振动基础模式（图7）。利用这两个计算方法，可以得出相当于建筑物总重量12%的基部剪切力。随着计算能力的提高，以前处于开发阶段但没有付诸实施的各种程序得以使用，包括动力的模态叠加法（图

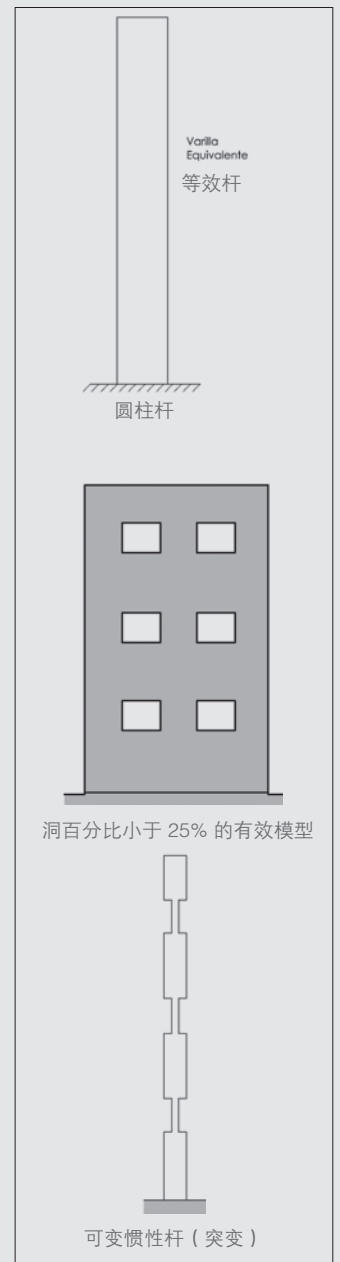


图5 杆类型模型

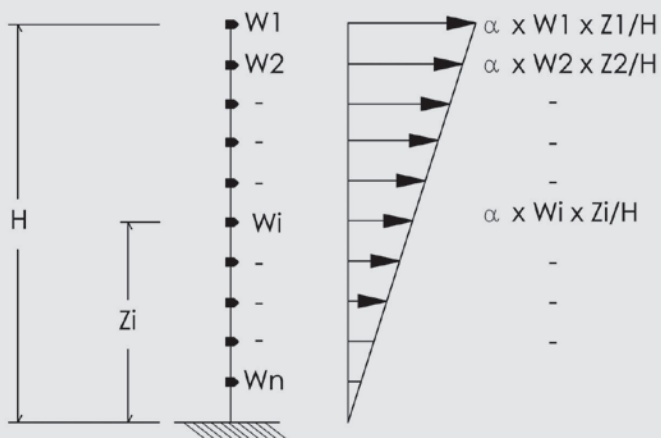


图6 加速度的线性分布

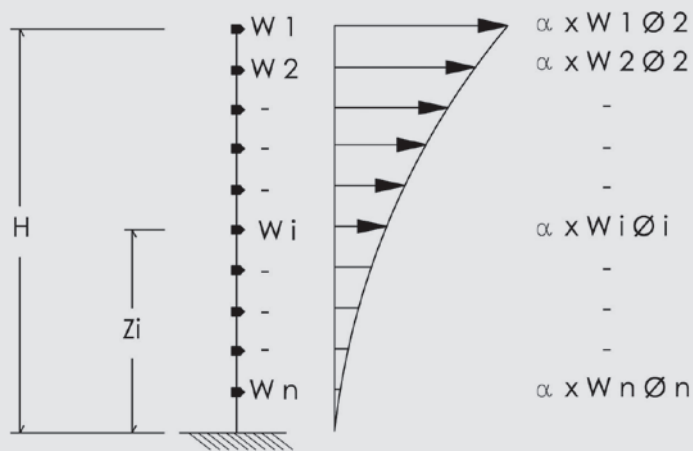


图7 具有第一振型模式的加速度

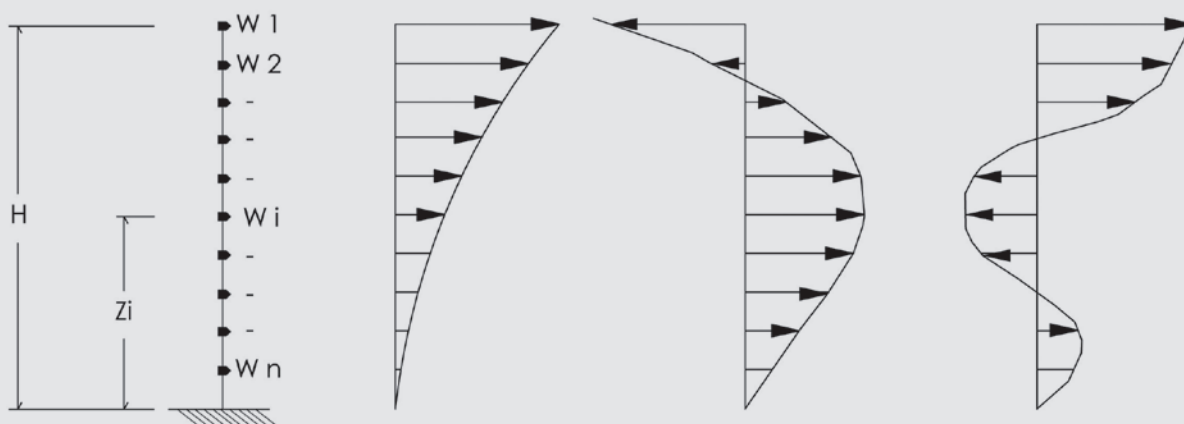


图8 谱模态叠加法

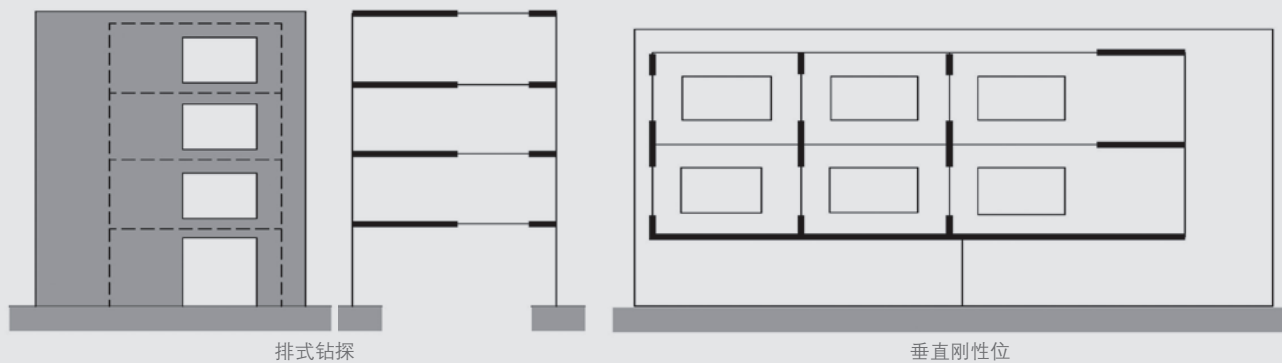


图9 等效平面框架模型



图 10 Amolanas 桥



图 11 Marga Marga桥的弹性支撑物

8)、拟加速度谱的使用，以及用于计算与记录实际和人工地震相关的反应时间的各种技术。在此之后，工程师开始应用矩阵分析的方法，并建立“等效框架”数学模型（图9）替代了等效杆。“等效框架”认为对每个阻力轴进行结构建模可构建整个建筑的综合三维模型，其中首个模型为拟三维模型。此模型单独考虑各个平面的阻力轴，并假定其平面内是无限刚性水平隔膜，所有楼层上具有位移相容性，而且通过混合侧翼的作用恢复结构的统一性。

20 世纪 70 年代中期，产生了新一代的小型计算机，与以往的大型计算机相比价格更低，容量更大。利用新的工具，可以通过六自由度的结构元件来解决三维形式问题，并且应用钢筋混凝土的低应变来承受抗扭应力。此外，在以前的技术条件下被认为是无法使用的“有限元素法”在当时也逐渐流行起来。在过去的几十年里，人们采用了很多计算程序。例如，在分析和设计过程中采用构造性方法、“压拉杆”法，使用地震隔震能量消散器，以及“容量-需求”的非线性静态程序分析，等等。

而目前在智利，我们可以看到许多在设计上融入现代保护理念的项目。Amolanas 桥就是其中之一，它位于圣地亚哥以北，桥身设有减震器来连接南部入口支撑物与上层结构（图10）。另一个例子是位于比尼亚德尔玛市 Troncal Sur 公路上的 Marga-Marga 高架桥。在该桥上安装有地震隔离装置，用于连接沟渠和桥面（图11）。然而，建筑物的抗震性能并不总是在最终竣工后才得出的。Telefónica 大楼就是一个很好的例子（图12~13），它的建设分为两个阶段：先建设两座相距30m的钢筋混凝土塔楼，然后通过钢斜杆以4个楼层高度的间距连接楼层及每个楼层上的后张楼板，从而将两座塔楼连为一体。

简单地说，地震作用是强迫施加的高频率移动，会影响建筑物的地面基层部分，导致高层部分产生加速度和惯性力。因此，如果安装基部缓冲装置来部分或全部阻止震动源到达建筑物，则可减弱这些影响，但这种装置在智利的应用并不普遍。具有代表性的实例是天主教大学的临床医院和位于拉雷纳区的Military军医院（图14~16）。



图 12 施工中的 Telefónica 大楼



图 13 竣工后的 Telefónica 大楼





图 14 在军医院的1层安装隔离物



图 15 军医院隔离物详细特征



图16 新建的Military军医院

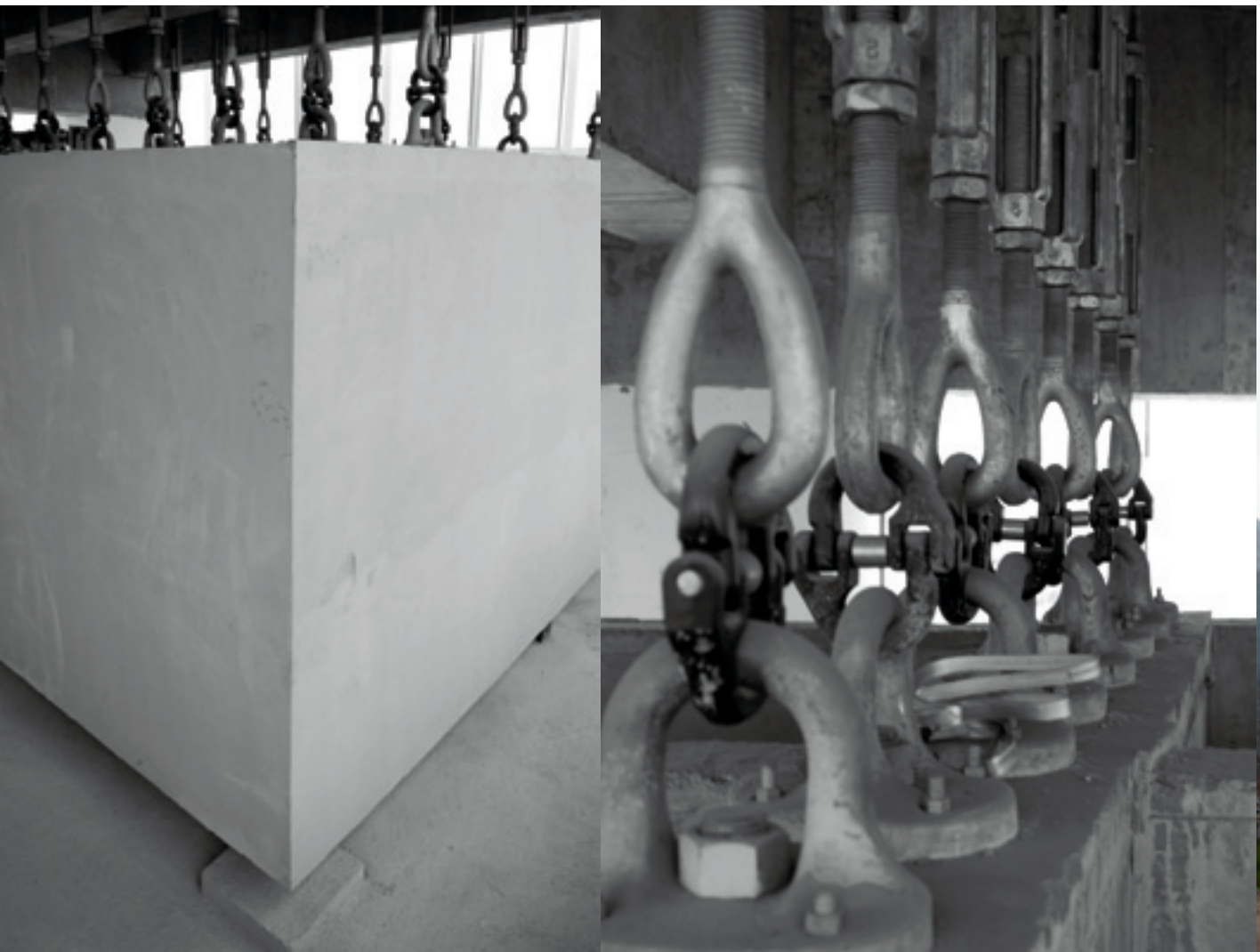


图 17 Parque Araucano 大楼的调质阻尼器



图 18 Titanium 大楼



图 19 Titanium 大楼的能量消散器



使用隔震装置实现振动控制是一种能量消散的具体应用，在低层和多层建筑中非常实用，但对于非常细长的结构，由于会导致长时间的振动，因此是不适合的。控制高楼振动的另一个方法是使用调质阻尼器（TMD）。利用一个振动频率与结构的基础模式频率相接近的摆动元素，将其附加到结构后，它会吸收相当一部分的能量。这样会迅速削弱振动的振幅，与真实阻尼器的效果类似。此种解决方案已经应用到了位于拉斯孔德斯（Las Condes）区的 Parque Araucano 大楼上（图 17），该大楼在最高楼层的顶端安置了两个巨大的摆锤。在建筑学允许的范围内，不使用调质阻尼器而改为采用层间阻尼器或机械工具可能会更加方便，它们在发挥作用时会改变行为特征。这一技术在 Titanium 大楼上得到了应用，该大楼目前处于建设阶段（图 18~19）。

在不久的将来，数字计算机飞速发展的优势将带来振动削弱和控制机制的重要拓展，而这一拓展将通过量子力学的应用来实现。这一规律从日常生活中的家用设备上即可略见一斑，例如手机、微波炉，或医学上的扫描仪、磁共振成像等。在能量消散不明显的建筑结构中，显然需要安装主动消散装置，因为其反应异常迅速，可视为瞬时发生。从材料学上讲，具有形状记忆特性的元素和磁流变器件已经发明出来，而后者在建筑物的震后完整性方面起着极为重要的作用。

科学和技术是一个统一体的两端，它们会继续发展到超出我们想象的境界。每个新的发展就如同棋局中的变招，都将开创一片新的天地。但是，可以肯定的是，今天的知识在未来不会依旧无名，因为新的发展成果就是基于当前的知识。我们今天所做的工作将接受后人的检验。



致谢

文中展示了许多建成建筑和施工现场的照片，是由工程师 Mauricio Sarrazín、René Lagos、Marianne Kú pfer、Daniel Stagno、Rodrigo Mujica、Alfonso Larraín 和 Beatriz Weil 所提供的。我非常感谢他们的宝贵贡献，同时一并向负责各个项目建筑和结构设计的专业团队致谢。

Tomás Guendelman Bedrack.

智利著名土木工程师，在对复杂各异的建筑进行分析、结构计算和地震评估方面具有丰富的经验。1962年，毕业于智利大学土木工程系。1965年，获加利福尼亚伯克利大学理学硕士学位。2008年，获得拉塞雷纳大学名誉博士称号。担任大学教授 40 多年，是 50 多本技术刊物的撰稿人和专业杂志的专栏作家。此外，他还担任智利工程师学会、工程师学院以及土木和结构工程师协会的主任，并且出任 IEC Ingeniería S.A. 和 Alta Ingeniería S.A. 的股东和总裁，在高层建筑物的结构和地震分析方面累积了 4 000 余万 m² 的设计经验，并为体型复杂的项目、地震评估项目确立标准和起草技术规范。他所获的诸多奖项包括：2002 年 Achisina 地震工程杰出贡献奖，2004 年土木和工业工程师协会颁发的国家工程奖，以及 2009 年智利工程师学会授予的金质奖章，这是授予智利工程师的最高荣誉。