

亚马逊流域玛代拉河 Santo Antônio 鱼道设计与建造的启示

张 辉¹, KYNARD Boyd², JUNHO Ricardo³, 杜 浩¹, 危起伟¹

(1. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 湖北 武汉 430223;

2. BK Riverfish, LLC., 28 Echo Hill Rd., Amherst, MA 01002-1633, USA;

3. HÍDRICON Water Resources Consultants LLC., Rua Ricardo de Carvalho 48,
São Bento 30.360-020, Belo Horizonte, MG, Brazil)

摘要: Santo Antônio 过鱼设施位于亚马逊河最大支流玛代拉河下游,其设计规模宏大,在世界范围内鲜有,并且工程建设地所在区域水文环境和鱼类生物学特征等与我国长江较为类似,通过分析该过鱼设施,得出启示主要包括:(1)过鱼设施是为生物对象设计的水利工程,其设计和建设过程中必须由工程师和生物学家紧密合作;(2)吸引水流对过鱼设施的成败起关键性作用,虽然吸引水流系统需要较大投资并且运行过程中会损失大量的水能,但从确保过鱼设施效果而言是非常必要的;(3)物理模型对于鱼道进口位置、鱼道内部水力学特征的确定等具有重要参考价值,尤其是在 1:1 局部模型内开展的生物学试验是细化和优化鱼道内部结构细节的有效方法;(4)卵石框(石笼)隔板的水池分隔方法兼具水池式鱼道与仿自然通道的双重特性,并且完工后还可根据鱼道的运行情况灵活调整,非常方便;(5)进口处采用较高的人字闸门,既可适应尾水变化,又可与吸引水流系统相配合,创造出有效的吸引水流,一举多得;(6)全部采用大功率灯泡式水轮机是保护下行鱼类的有效措施;(7)监测系统和公众教育等配套设施的建设非常必要,有利于改进鱼道运行方式和提高过鱼效率。

关键词: Santo Antônio 鱼道;玛代拉河;启示

中图分类号: TV222, S956.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2013)04-0095-06

亚马逊河(Amazon River)位于南美洲,是世界流量最大、流域最广、支流最多及第二长的河流;流量达 20.9 万 m³/s,大约相当于 7 条长江的流量,占世界河流总流量的 20%;流域面积达 705 万 km²,支流数超过 1 100 条。玛代拉河(Rio Madeira)全长约 3 250 km,是亚马逊河最长的支流,流域面积 85 万 km²,平均流量为 24 397 m³/s(2 346 ~ 52 804 m³/s)。玛代拉河水能资源丰富,同时也是世界上鱼类生物多样性最丰富的区域之一,是否进行梯级水电开发一直饱受争议。为了不让 2001-2002 年出现的广泛性能源短缺局面再次重演,巴西政府在 2007 年 7 月才最终决定修建 Santo Antônio 大坝和 Jirau 大坝,以期为全国增加 8%~10% 的电力供应,但同时巴西的环境保护部门对大坝的建设和运行也提出了 33 个附加条件。

过鱼设施工程被认为是 Santo Antônio 大坝最重要的生态保护措施并被寄予厚望,如果过鱼设施建设失败,多种珍稀的洄游性鱼类将会濒临灭绝

(Godinho & Kynard, 2009)。因此,巴西政府和水电站所有者(Santo Antônio Energia)对过鱼设施的设计、建设和运行花费巨大。该过鱼设施在设计和建造过程中,先后有巴西和美国等多位著名的鱼类学家和水利学工程师参与,提出了很多新的设计理念和技术方法,可谓是集目前世界过鱼设施建设技术之大成;另外,由于该设施规模宏大,在世界范围内鲜有,并且其所在玛代拉河水文环境和鱼类生物学特征等与我国长江较为类似,因此有必要对 Santo Antônio 过鱼设施进行深入分析,以促进我国过鱼设施理论及技术的发展。

1 工程水文环境

玛代拉河目前在建和规划的共有 4 座水电站,是南美洲最大的基础设施建设工程。最下游的 2 个水电站位于巴西境内,分别为 Santo Antônio 大坝和 Jirau 大坝,稍上游的第 3 座水电站 Guayaramerin 位于巴西和玻利维亚边界,更上游的第 4 座水电站 Cachuela Esperanza 则位于玻利维亚境内。上游的 2 座水电站目前正处规划阶段,下游的 2 座水电站则正在建设之中。2011 年 12 月, Santo Antônio 水电站开始蓄水发电, Jirau 水电站也预计将于 2013 年开始蓄水发电。Santo Antônio 和 Jirau 大坝预计耗资

收稿日期:2013-04-16

通讯作者:危起伟,1960 年生,男,博士,研究员,主要从事保护生物学研究。E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

作者简介:张辉,1982 年生,男,博士,副研究员,主要从事河流水生生物多样性研究及保护工作。E-mail: dingo-zh@163.com

156 亿美元(其中 Santo Antônio 为 70 亿美元),包括大约 100 亿美元的工程建设和发电机组费用以及 50 亿美元的船闸建设、传输线路和环保措施的投入。

处,一处位于主河槽,另一处位于南岸邻接处,2 处溢洪道最大泄流量达 $84\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,能较好地控制水位;另外,该工程还包括 2 个鱼道和 1 个船闸。

2 鱼类生物学概述

对 Guaporé 和 Mamoré 河下游、玛代拉河及其支流和主要洪泛平原湖泊中鱼类的调查结果表明,研究区域共分布约 900 种鱼类,是世界上鱼类生物多样性最丰富的区域。总体而言,这些鱼类的洄游行为十分复杂并且目前的了解也还非常有限。过鱼设施的主要目标种类包括大型洄游性的鲶属 (*Brachyplatystoma*) 和脂鲤科 (Characins) 鱼类。鲶属鱼类在高水位期洄游,在瀑布或激流下产卵,游泳能力较强,能轻易地越过激流,捕捞量约占市场的 5%,市场价格较高;其中,最具代表性的大型鲶名为 Dourada (*Brachyplatystoma rousseauxii*),从亚马逊河口洄游至安第斯 (Andean) 山脉进行繁殖,游程超过 3 000 km,平均每天上溯 19 km,需 4~5 个月才能到达目的地,被认为是世界上洄游距离超长的鱼类之一 (Barthem et al, 1991)。脂鲤科鱼类在低水位期洄游,能形成大的洄游性鱼群,偶尔越过激流,捕捞量约占市场的 75%,市场价格较低。在玻利维亚境内,市场占有率 80% 的商业捕捞鱼类为洄游性的,主要包括虎鲶 (*Pseudoplatystoma fasciatum*)、丝条短平口鲶 (*Brachyplatystoma filamentosum*) 和红肚仓 (*Piaractus brachipomus*)。

3 过鱼设施总体设计

Santo Antônio 工程的过鱼设施由上行过鱼设施和下行过鱼设施 2 部分组成 (图 2);其中,上行过鱼设施由左右 2 部分组成,右侧的鱼道位于 Presidium 岛上,有 2 个进口和 1 个出口,目前正在建设,左侧河岸上规划有另外 1 条鱼道,准备将来进行建设。下行过鱼设施由 44 台灯泡式水轮机组 (Kaplan bulb turbines) 构成。

3.1 过鱼设施结构

图 3 显示了 Presidium 岛上行过鱼设施的部分重要结构;其中,进口采用很高的人字闸门,较高的高度是为了使该进口能适应不同的水位条件,在不同水位条件下上溯鱼类均通过该进口进入,这不同于以往的一些过鱼设施,为了适应不同的水位条件,设置多个进口的设计方案;另外,人字闸门还具有另外一个重要作用,即根据鱼道内水量和尾水流场状况进行开启状态的调节,以便营造出理想的吸引水



图 1 玛代拉河和 Santo Antônio 大坝地理位置
Fig. 1 Locations of the Madeira River and the Santo Antônio Dam

Santo Antônio 工程为径流式水电站,位于巴西 Rondônia 州 Porto Velho 市上游约 6 km (图 1)。玛代拉河 Santo Antônio 大坝所处江段的流量为 $3\ 150 \sim 41\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$,工程完工后尾水高程为 45.10~59.35 m,变幅约为 14.0 m,库区与尾水的水位差 (水头)为 10.65~24.90 m (Machado, 2012)。就流量而言,工程建设地与我国长江中游湖北宜昌段的流量较为接近。2008 年开工建设,预计将于 2015 年完工,为重力混合式坝,坝高 13.9 m,坝长 3 100 m (图 2)。库区正常蓄水位为 70 m,平均最大水深约为 11 m,库区水面面积为 $271\ \text{km}^2$ (其中 $164\ \text{km}^2$ 为原有河道面积)。44 台发电机组 (每台 71.6 MW) 分为 4 段,总装机容量为 3 150.4 MW,发电机组最大过流流量为 $24\ 684\ \text{m}^3/\text{s}$ 。泄洪道分为 2

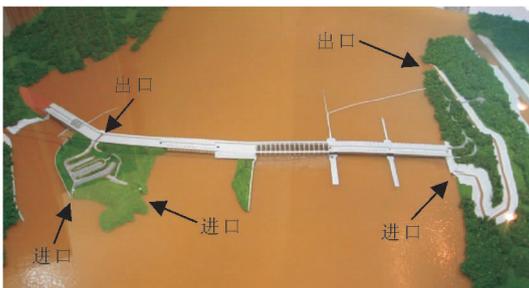
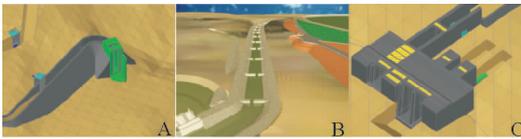


图 2 Santo Antônio 工程及过鱼设施布局
Fig. 2 Layout and main features of the Santo Antônio fish pass facilities

流。通道主体全长 1 200 m,坡度 2.5%,下段宽度为 6 m,中段宽度为 7 m,上段宽度为 10 m,主要是结合 Presidium 岛的地形进行设计,以减少投资和工程量。通道主体采用卵石框(石笼)隔板(Gabion sills)方式,水池长 10 m,高 2.5 m,运行水深 2.0 m。设计运行流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,流速中值 0.4 m/s ,最大值 2.8 m/s ,能量耗散率 130 W/m^3 。在出口处,专门设置了科研监测和取样设备,包括声纳成像计数设备和超声波及无线电遥测监测系统等,对过鱼效果进行监测后认为是改进过鱼设施运行最有效的方法。



A-进口;B-通道主体;C-出口

图3 右侧上行过鱼设施结构

A-Entrance, B-Main channel, C-Exit

Fig. 3 Structure of right upstream fish pass facilities

下行过鱼通道主要由 44 台灯泡式水轮机组形成,灯泡式水轮机组是一种生态友好型水轮机组。从发电来讲,这种水轮机组非常适合高流速、低水头的大坝,转轮叶片很大、转速慢,并且叶片角度可以调整,能在不影响发电效益的情况下降低对下行鱼类的损伤。Santo Antônio 水电站是目前世界上第二大的由灯泡式水轮机组构成的水电站,就单台水轮机组的功率而言,达 71.6 MW,超过了日本的 Tadammi,位居世界第一;就转轮直径而言,达 8.15 m,仅次于美国 Murray Lock 的 8.41 m。

3.2 吸引水流系统

相对于物理栅栏、电导鱼等其它一些诱鱼和导鱼措施,水流对鱼类行为的影响被认为是最原始和最切实有效的(Clay, 1995; FAO/DVWK, 2002; Vigneus, 2002)。由于进口相对较小,为了使上溯鱼类能顺利地找到进口位置,需要在进口附近区域形成尾羽状以区别于水轮机尾水的流场,以便诱导鱼类搜寻到进口;同时,由于坝下水位有较大的水位变幅,在高水位条件下鱼道的下段流速会降低,甚至会形成静水区域,这十分不利于鱼类的上溯。因此,需要额外补充一些水量,使得鱼道下段在高水位条件下仍然能维持一定的流速;另外,由于鱼道主体通道内流量较小,通过进口排出后,难以与坝下紊流相竞争,从而营造出能吸引上溯鱼类找到进口位置的水流条件,也需要通过增大进口排水量来诱导鱼类找到进口的水流条件。Presidium 岛鱼道补水系统主要由引水管道和消能体构成(图4)。引水管道分为

左右 2 支,在鱼道不同位置各通过 6 处消能体将水量补充进鱼道主体,消能体的主要作用是降低水流从引水管道进入鱼道主体的能量和流速,使其与鱼道主体内的流速基本一致,避免影响鱼类上溯。Santo Antônio 岛鱼道的吸引水流系统最大补水量为 $52 \text{ m}^3/\text{s}$,即鱼道总流量最小为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,正常为 $46 \text{ m}^3/\text{s}$,最大为 $62 \text{ m}^3/\text{s}$,正常运行流量占发电机组最大过流量的 0.19%。

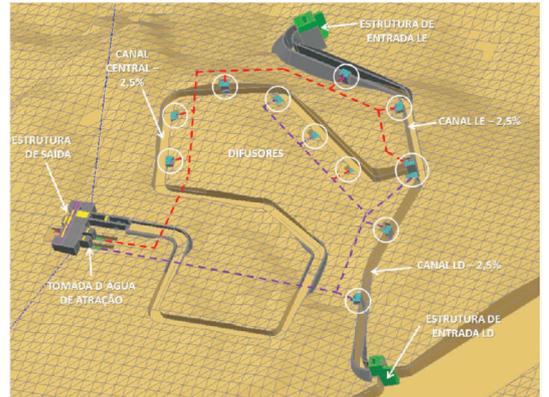


图4 Presidium 岛鱼道补水系统

(虚线为引水管道,白色小圆内为消能体)

Fig. 4 Catching water system of the fishway in the Presidium Islet (Dashed lines indicate the pipes, white circles indicate the energy dissipation structure)

3.3 物理模型

物理模型分析在水工建设中一直是重要步骤之一(Clay, 1995; Vigneus, 2002)。一般认为单纯的水力学模型可基于相似原理按一定的比例尺进行缩放,如果需要开展生物学试验,则不宜进行简单的比例尺缩放,因为相似原理并不适用于生物。在 Santo Antônio 鱼道的设计过程中,先后采用 1: 80 的物理模型分析确定 Presidium 岛 2 个鱼道进口的位置,1: 10 的物理模型分析鱼道主体通道内的水流条件,最重要的是还采用了鱼道主体通道的鱼道的局部模型,开展了不同内部结构下水力学特征和鱼类上溯行为及过鱼效率试验,为过鱼通道内部结构的设计和优化奠定了良好的基础。

1: 1 的局部模型选址建设在玛代拉河的沿右岸侧,靠近 Teotônio 瀑布($8^{\circ}51'42''\text{S}; 64^{\circ}03'49''\text{W}$)的上游(Junho et al, 2012; Rodrigues et al, 2012)。模型建设地枯水期露出水面,很方便施工,而洪水期(2-5月)则被洪水淹没,模型内部形成自然的水流环境,非常方便开展相关的生物学试验(图5)。该模型于 2009 年 10 月开始施工,2010 年 1 月完工,耗时约 4 个月。



A-枯水期; B-丰水期

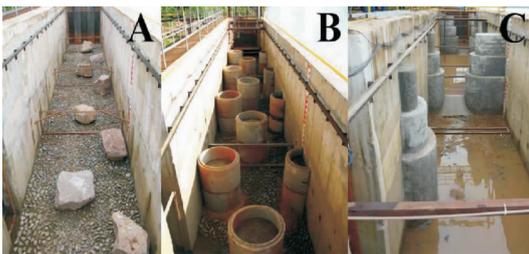
图5 1:1水力学局部模型外观

A-Dry seasons; B-Flood seasons

Fig. 5 Hydraulic partial model appearance (Scale: 1: 1)

模型全长 51.0 m, 从上游向下游, 前 11.3 m 为供水段, 中间 30.0 m 为测试段, 末端 9.7 m 为出水段。供水段和出水段的坡度均为 0, 测试段的坡度为 3% (Santo Antônio 鱼道的最大预期坡度)。模型内部宽度为 3.75 m, 为 Santo Antônio 鱼道当时设计宽度的 50%。模型高度从上游的 4.6 m 逐渐增加至下游的 5.5 m, 设计的最大流动水深为 4.0 m。供水段和出水段的河底高程分别为 62.4 m 和 61.5 m。闸门、栅栏和拦污栅的宽度和高度分别为 3.75 m 和 4.0 m。供水段安装的金属拦污栅可以让上溯成功的鱼类顺利通过, 但可以防止大的漂浮物和树木残骸等进入到实验模型内。虽然模型内水位主要取决于试验时玛代拉河的水位, 但通过安装在狭缝内的铰链式闸门也可以控制流量和水位。如果需要, 可以将闸门关闭, 将模型内的水抽空。

模型内部结构的设计则分为几个阶段, 第一阶段是确定内部结构的大类, 采用 3 种最基本的内部结构(图 6)。通过声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 观测水力学特征, 双频声纳成像仪 (DIDSON)、射频识别系统 (RFID) 观测鱼类上溯行为之后, 初步遴选出较好的内部结构方式为台阶状的分隔构件。第二阶段则在此基础上, 根据不同鱼类的测试结果, 对内部结构的细节进行优化调整, 如水池长度、分隔体的宽度和高度等, 最终得到最优的结构设计。



A-巨砾; B-圆形混凝土桩; C-台阶状分隔构件

图6 1:1局部模型3种不同的内部结构

A-Boulders, B-Circle concrete piles, C-Step-shaped separated components

Fig. 6 Three different interior structures in the partial model (Scale: 1: 1)

3.4 水池分隔技术

过鱼通道主体内部水池分隔的方法也很巧妙, 以往水池式鱼道的分隔构件主要由预制混凝土或木料制作, 混凝土隔板坚固耐用, 但建成后不易进行改建, 木质隔板便于以后改建, 但使用寿命较短, 数年后需维护更换 (Clay, 1995; Marmulla, 2001)。Santo Antônio 鱼道则创造性地采用了卵石框(石笼)隔板(图 7); 即将卵石陈放在由特制金属丝编织的长方体形网兜内, 再通过这些长方体的堆叠形成水池间的分隔。采用这种分隔方式建造的鱼道, 不但在工程施工完成后可根据鱼道运行情况方便灵活调整, 且使用寿命长, 还兼具水池式鱼道与仿自然通道的双重优良特性, 极具参考价值。



图7 石笼隔板建造方法(A)与实际运行情况(B)

Fig. 7 Construction methods of gabion baffles (A) and the actual running status (B)

4 启示

通过对 Santo Antônio 过鱼设施设计及建设过程的分析, 可以得到如下启示:

(1) 过鱼设施是为生物对象设计的水利工程, 在其设计和建设过程中, 必须由工程师和生物学家的紧密合作才能完成。

(2) 吸引水流对过鱼设施的成败起关键性作用, 虽然吸引水流系统需要较大投资并且运行过程中会损失大量水能, 但从确保过鱼设施效果而言, 是必不可少的。

(3) 物理模型对于鱼道进口位置及其内部水力学特征的确定具有重要的参考价值, 尤其是在 1: 1 局部模型内开展的生物学试验是细化和优化鱼道内部细微结构的有效方法。

(4) 卵石框(石笼)隔板的水池分隔方法, 兼具水池式鱼道与仿自然通道的双重特性, 并且在工程完工后还可根据鱼道运行情况灵活调整, 非常方便。

(5) 进口处采用较高的人字闸门, 既可适应尾水变化, 方便栖息于不同水层的鱼类进入, 又可与吸引水流系统相配合, 创造出有效的吸引水流。

(6) 水轮机组全部采用大功率的灯泡式水轮机, 为下行鱼类的保护奠定了良好的基础。

(7)监测系统和公众教育等配套设施的建设也非常必要,监测系统的观测结果是改进鱼道运行方式、提高过鱼效率的基础,而公众教育等配套设施的完善,不但可扩大过鱼设施的社会影响力,反过来对改进鱼道运行方式和提高过鱼效率也具有一定的促进作用。

志谢:Santo Antônio Energia 公司环保部门及相关专家安排了现场考察和会议交流,巴西米纳斯联邦大学过鱼设施中心 Alexandre L. Godinho 博士全程陪同考察,赴巴西考察过鱼设施得到了中国长江三峡集团公司的资助,在此一并表示感谢!

参考文献

- Amazon River [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Amazon_River, 2012-09-28.
- Barthem R B, Ribeiro M C L B, Petrere M Jr. 1991. Life strategies of some long distance migratory catfish in relation to hydroelectric dams in the Amazon Basin [J]. *Biological Conservation*, 55: 339-345.
- BBC. Brazil gives Amazon dams go-ahead [EB/OL]. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/6286804.stm>, 2012-09-28.
- Clay C H. 1995. Design of fishways and other fish facilities (Second edition) [M]. Boca Raton: Lewis Publishers.
- FAO/DVWK. 2002. Fish passes: design, dimensions and monitoring[M]. Rome: FAO.
- Godinho A L, Kynard B. 2009. Migratory fishes of Brazil: Life history and fish passage needs [J]. *River Research and Applications*, 25(6): 702-712.
- Junho R A C, Godinho A L, Kynard B, et al. 2012. Three types of energy dissipaters and fish passage in an experimental fishway built in the Madeira River[A]. *Proceedings of the II International Symposium on Fish Passages in South America* [C]. Toledo-Paraná, Brazil.
- Machado B P. 2012. Large hydropower plants of Brazil [J]. *Comprehensive Renewable Energy*, 6: 93-127.
- Madeira River [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Madeira_River, 2012-09-28.
- Marmulla G. 2001. Dams, fish and fisheries: Opportunities, challenges and conflict resolution[M]. Rome: FAO.
- Rodrigues R R, Godinho A L, Junho R A C, et al. 2012. Influence of hydraulics on the upstream passage performance of Amazonian fishes in an experimental fishway[A]. *Proceedings of the II International Symposium on Fish Passages in South America* [C]. Toledo-Paraná, Brazil.
- Santo Antônio Dam [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Santo_Antonio_Dam, 2012-09-28.
- Santo Antônio Energia. Santo Antônio Energia [EB/OL]. <http://www.santoantonioenergia.com.br>, 2012-09-28.
- Vigneus E. 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring[M]. Rome: FAO.
- WWF. Madeira River Basin: Hydropower dams in the heart of the Amazon [EB/OL]. http://wwf.panda.org/what_we_do/footprint/water/dams_initiative/examples/madeira_river_basin, 2012-09-28.

(责任编辑 万月华)

Implications from the Design and Construction of Santo Antônio Fishway in the Madeira River in the Amazon Basin

ZHANG Hui¹, KYNARD Boyd², JUNHO Ricardo³, DU Hao¹, WEI Qi-wei¹

(1. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of
Fishery Sciences, Wuhan 430223, P. R. China;

2. BK Riverfish, LLC., 28 Echo Hill Rd., Amherst, MA 01002-1633, USA;

3. HÍDRICON Water Resources Consultants LLC., Rua Ricardo de Carvalho 48,
São Bento 30.360-020, Belo Horizonte, MG, Brazil)

Abstract: The Santo Antônio Fishway, which was located in the downstream area of the Madeira River in the Amazon Basin, had so large-scale design that it was very rare in the world. Besides that, the hydrological environment and biological characteristics of the fish pass related were very similar to that of the Yangtze River, which could take as a good example for us in the Yangtze River. By thorough analysing the fish pass facilities, some good suggestions could be summarized as follows. 1) The fish pass was a water conservancy project designed for biological objects, so its design and construction need the close co-operation of engineers and biologists. 2) Catching the flow played a critical role to the success of the fish pass, although the use of catch flow need big invest and would lose some water energy, however, it was a key factor to ensure the effectiveness of the fish pass. 3) Physical model had important reference value for ensuring the design of entrance locations, interior hydraulic structure, etc., Especially the biology experiment, which had done within 1: 1 partial model, was an effective method for detailing and optimizing the details of the inner fishway structure. 4) Gabion baffles made the channel possess the advantages of pool fishway and nature-like fishway, and could be adjusted even after the project finished, so it was very useful and convenient. 5) The higher miter gates at the entrance, not only could adapt the variation of the tail water, but also could match the system of catching flow. 6) The application of high-power bulb turbines was a good way to protect the downstream fishes. 7) Monitoring system and public education facilities were necessary, they were also very helpful to improve the operation methods and efficiency of the fish pass.

Key words: Santo Antônio fishway; Madeira River; implication