

RELAZIONE GENERALE INTEGRATA E SINTESI COMPRENSIVA

Il Sistema Cyber-Fisico Aethelbard e l'Hydro-Link Priula sul Fiume
Brembo

Rapporto Unificato d'Ingegneria Strutturale, Meccatronica e Validazione Sperimentale

Dott. Ing. Antonio Triassi

Abstract

Il presente report costituisce il quadro d'unione e la sintesi formale dell'intera documentazione tecnica, analitica e divulgativa riguardante l'infrastruttura bionica **Hydro-Link Priula** (Sistema Aethelbard), progettata per il valico del fiume Brembo nel comune di San Giovanni Bianco (BG). Il documento raccoglie in una trattazione organica i principi della matematica morfonica, l'applicazione delle leggi di omotetia anisotropa, il formalismo algebrico del gruppo di gauge non abeliano $SU(3)$ su $\mathbb{CP}^2$, la verifica delle tensioni di membrana ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), il bilancio termodinamico Net-Positive (+24%) e la risoluzione analitica del conflitto di similitudine combinata Cauchy-Froude per il modello di collaudo d'officina in scala 1 : 10.

1 Executive Summary e Inquadramento Generale

Il progetto *Hydro-Link Priula* rappresenta una rottura epistemologica rispetto all'ingegneria civile tradizionale: supera il paradigma novecentesco delle masse passive in cemento armato rimpiazzando la rigidità d'inerzia di Saint-Venant con la resistenza per forma della geometria sigmoidale ad arco a papillon (*Bow-Tie*) e l'efficienza dell'informazione computazionale gestita in tempo reale da moduli **Edge FPGA**.

1.1 Scelte di Progetto e Vincoli NTC

- **Geometria e Luce Libera:** L'opera supera la campata di $L = 350.00$ m del fiume Brembo senza pile in alveo, impostando l'altezza utile delle torri d'estremità a $H = 50.00$ m per garantire il rispetto del rapporto di freccia ottimale $H/L = 1 : 7$.
- **Omotetia Anisotropa Rinormalizzata:** Per evitare le incongruenze distributive delle riduzioni isotrope lineari umane, il modello fissa le costanti antroporfe invarianti a $D = 6.00$ m per il diametro esterno del condotto e a $M = 7.00$ t per la massa reale del vettore mobile (*pod*).
- **Stato Tensionale di Membrana:** Lo sforzo normale massimo di compressione allo Stato Limite Ultimo (SLU) è pari a $N_{SLU} = 85.30$ MN. Proiettato sulla sezione mista omogeneizzata ($A_{id} = 1.186$ m²), inducono una sollecitazione normale omogeneizzata di soli $\sigma_{reale} \approx 71.90$ MPa, corrispondente a circa il 16% della resistenza di calcolo dell'acciaio ($f_{yd} = 438.10$ MPa).

2 Fondamenti Matematici e Modello Assiomatico

La struttura poggia su quattro assiomi deterministici che vincolano il comportamento cibernetico e meccanico dell'opera:

1. **Assioma 1 (Autosimilarità Anisotropia):** Il rapporto adimensionale ad arco rispetta $k_{\text{NTC}} = H/L = 1/7 \approx 0.1428$, garantendo $H = 50.00$ m su $L = 350.00$ m.
2. **Assioma 2 (Cinematica Geometrica):** La traiettoria del pod si sviluppa lungo una rampa tridimensionale con pendenza fissa all'inflesso pari al 3% ($\theta \approx 1.72^\circ$).
3. **Assioma 3 (Controllo ad Alta Velocità):** L'unità Edge FPGA risolve la logica di stato con una latenza logica deterministica $\tau_{\text{FPGA}} \leq 12$ ns.
4. **Assioma 4 (Traferro Magnetico):** Sostentamento ferromagnetico passivo contactless (IronLev) con traferro nominale $\delta_0 = 5$ mm e ruote di emergenza in poliuretano su guida a "T" (classe SIL4).

2.1 Formalismo $SU(3)$ e Stabilità di Lyapunov

La rete di 48 micro-stralli in fibra di carbonio (CFRP) viene modellata nello spazio proiettivo complesso $\mathbb{CP}^2$ attraverso il gruppo di simmetria $SU(3)$. Le perturbazioni eoliche trasversali vengono descritte dal commutatore non abeliano di Yang-Mills $[D_x, D_y] = F_{xy} = \sum_{a=1}^8 F_{xy}^a \lambda_a$. Proiettando il tensore sulle matrici diagonali del sottogruppo di Cartan (λ_3, λ_8) , l'FPGA comanda agli attuatori piezoelettrici ($\tau = 15$ ms) variazioni di pre-tensione compensativa che mantengono la derivata temporale della funzione energetica di Lyapunov strettamente negativa ($\dot{V}_G < 0$).

3 Ingegneria della Sezione Mista e Verifiche NTC

Per superare la fragilità elastica della fibra di carbonio, la spina dorsale comprende una sezione composta mista:

- **Centine Scatolate:** Acciaio S460QL ($f_{yk} = 460$ MPa), $A_{\text{acc}} = 0.58$ m².
- **Camicia di Confinamento:** Calcestruzzo ad Altissima Prestazione UHPC ($f_{ck} \geq 150$ MPa) con il 2.5% in volume di micro-fibre corte in acciaio, $A_{\text{UHPC}} = 2.45$ m².
- **Area Ideale Equivalentee:** Con un coefficiente d'equivalenza $n \approx 4.04$, $A_{\text{id}} = A_{\text{acc}} + A_{\text{UHPC}}/n = 1.186$ m².

$$\sigma_{\text{reale}} = \frac{N_{\text{SLU}}}{A_{\text{id}}} = \frac{85.30 \text{ MN}}{1.186 \text{ m}^2} \approx 71.90 \text{ MPa} \ll f_{yd} = 438.10 \text{ MPa} \quad (1)$$

4 Validazione Sperimentale e Scaling Dinamico 1:10

Il protocollo d'officina per il prototipo fisico da 35.00 m ($L_{\text{lab}} = 35.00$ m, $H_{\text{lab}} = 5.00$ m, $D_{\text{lab}} = 0.60$ m) applica il fattore di scala geometrico $\lambda = 0.1$:

- **Massa Volumetrica** ($\lambda^3 = 0.001$): $M_{\text{lab}} = 7000 \text{ kg} \cdot (0.1)^3 = 7.00 \text{ kg}$.
- **Forza Assiale** ($\lambda^2 = 0.01$): $N_{\text{SLU, lab}} = 85.30 \text{ MN} \cdot 0.01 = 0.8530 \text{ MN}$ (~ 87 t).

4.1 Risoluzione del Conflitto Cauchy-Froude

A gravità costante (g), la similitudine di Cauchy impone $\lambda_{t,C} = \lambda^1 = 0.100$, mentre la similitudine di Froude impone $\lambda_{t,F} = \sqrt{\lambda} \approx 0.3162$. La discrepanza viene sanata disaccoppiando le prove:

1. **Fase A (Galleria del Vento / Cauchy):** Test aeroelastico con tempo riscaldato $\lambda_{t,C} = 0.1$ ed intervento attuatori a $\tau_{lab} = 1.50$ ms.
2. **Fase B (Buckling Idraulico / Froude):** Compressione assiale quasi-stolica fino a 0.8530 MN e transito pod da 7.00 kg sotto scala temporale $\lambda_{t,F} = 0.3162$.
3. **Compensazione Meccatronica Attiva:** L'FPGA bilancia le prove stazionarie modulando la gravità virtuale sui cavi con fattore $\mu_g = \lambda_{t,F}/\lambda_{t,C} = \sqrt{10} \approx 3.162$.

5 Cinematica del Pod e Bilancio Net-Positive (+24%)

Il transito del pod da 7.00 t si sviluppa a 80 km/h con sollevamento verticale nei piloni a +50.00 m e rilascio gravitazionale sulla sigmoide:

- **Moderazione Stazionaria:** $P_{staz} \approx 45.55$ kW per vincere la resistenza aerodinamica contenuta (330 N).
- **Frenata Rigenerativa:** Recupero di picco fino a 972.62 kW ($a = -2.5$ m/s²) stoccato in supercondensatori al grafene.
- **Rendimento Globale:** La combinazione con pellicola fotovoltaica CIGS e micro-turbine Venturi genera un surplus netto annuo del **+24%** restituito alla rete locale.

6 Quadro Sinottico Comparativo dei Documenti di Progetto

Table 1: Sintesi dei 5 Documenti della Progettazione Hydro-Link Priula

Documento	Ambito Strategico	Parametri e Risultati Chiave
Dalla Matematica Morfonica	Monografia Esecutiva	$L = 350$ m, $H = 50$ m, $\sigma \approx 71.90$ MPa, $A_{id} = 1.186$ m ²
Executive Summary	Sintesi Gestionale	Risposta 15 ms, Picco 972.62 kW, Surplus +24%
Contributo Teorico	Modellazione Assiomatica	4 Assiomi, Latenza FPGA ≤ 12 ns, $\delta_0 = 5$ mm, $\dot{V}_G < 0$
Validazione Sperimentale	Protocollo Scaling 1:10	$\lambda = 0.1$, $L_{lab} = 35$ m, $M_{lab} = 7$ kg, $\mu_g = \sqrt{10}$
Contributo Divulgativo	Cinematica e Bionica	$v = 80$ km/h, $P_{staz} = 45.55$ kW, Vento -64%

7 Conclusioni

Il quadro analitico e sperimentale dell'*Hydro-Link Priula* conferma la piena fattibilità dell'opera in conformità con le NTC2018. L'unione di omotetia anisotropa, sezione mista Acciaio S460QL-UHPC e controllo cyber-fisico attivo su FPGA garantisce elevatissima sicurezza sismica, stabilità al flutter ed efficienza energetica Net-Positive.

References

- [1] S. Musmeci, *Le strutture e la forma*. Roma-Bari: Laterza, 1975.
- [2] M. Peroni, *Ponti Sospesi. Storia, Tecnologia, Futuro*. Silvana Editoriale, 2023.
- [3] A. Triassi, "Dalla Matematica Morfonica al Cantiere Reale," *Ordine degli Ingegneri di Bergamo*, 2026.
- [4] A. Triassi, "Validazione Sperimentale e Criteri di Scaling Dinamico," *Ordine degli Ingegneri di Bergamo*, 2026.

