GALLERIA IDRAULICA AVANZATA

Conci Prefabbricati, Talpa Automatizzata, Sensori a Fibra Ottica e Manutenzione Predittiva



Scavo con TBM Ø 4,40 m



Posa dei Conci Prefabbricati



Monitoraggio dei Sensori FBG



Modello Digitale e Manutenzione Predittiva.



Ing. Diego Dell'Erba

Progetto avanzato
del rivestimento di una galleria idraulica Ø 4,40 m

Conci prefabbricati, sensori a fibra ottica FBG, Digital Twin e manutenzione predittiva

Relazione tecnico-strutturale di massima con sviluppo dei calcoli di sicurezza

Ingg. Andrea & Diego Dell'Erba

1. Premessa

La progettazione del rivestimento di una galleria idraulica moderna non può essere ridotta alla sola verifica resistente di un anello prefabbricato soggetto a pressione esterna.

Il rivestimento deve essere concepito come:

- sistema resistente;
- sistema di tenuta;
- sistema monitorabile;
- sistema digitale;
- sistema predittivo.

Il concio prefabbricato non è soltanto un elemento di rivestimento: è un componente attivo del sistema galleria, capace di restituire nel tempo dati su:

- compressione anulare;
- ovalizzazione dell'anello;
- comportamento dei giunti;
- gradienti termici;
- infiltrazioni;
- deformazioni locali;
- degrado progressivo.

La finalità non è solo costruire una galleria stabile oggi, ma **costruire una galleria che continui a essere compresa nel tempo**.

2. Dati geometrici di progetto

Si assume:

- **diametro interno**

$$D_i = 4.40\,m$$

- **raggio interno**

$$r_i = 2.20\,m$$

- **spessore rivestimento**

$$t = 0.30\,m$$

- **diametro esterno**

$$D_e = 5.00\,m$$

- **raggio medio dell'anello**

$$r_m = 2.35\,m$$

- **larghezza anello**

$$b = 1.50\,m$$

- **suddivisione anello**: 5 conci ordinari + 1 concio chiave.

Area resistente per metro di sviluppo longitudinale

$$A = t \cdot 1.00 = 0.30\,m^2$$

Area resistente dell'anello completo per fascia da 1,50 m

$$A_b = t \cdot b = 0.30 \cdot 1.50 = 0.45\,m^2$$

3. Ipotesi geotecniche di massima

Si assume una posa in terreno mediamente coerente-sabbioso, con falda presente.

Dati assunti

- copertura sopra estradosso:

$$H = 15.0\,m$$

- peso di volume terreno:

$$\gamma = 20\,kN/m^3$$

- coefficiente a riposo:

$$K_0 = 0.50$$

- peso di volume acqua:

$$\gamma_w = 10\,kN/m^3$$

- profondità asse galleria:

$$z_{asse} = 17.5\,m$$

Pressione verticale geostatica

$$\sigma_v = \gamma H = 20 \cdot 15 = 300\,kPa$$

Pressione orizzontale geostatica

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v = 0.5 \cdot 300 = 150\,kPa$$

Pressione idrostatica esterna in asse

$$u = \gamma_w z_{asse} = 10 \cdot 17.5 = 175\,kPa$$

Per uno studio di massima, assumo una **pressione esterna equivalente di progetto**:

$$p = 300\,kPa$$

Questa scelta è cautelativa ma ragionevole per un primo dimensionamento.

4. Compressione anulare media

Per un anello cilindrico soggetto a pressione uniforme esterna, il risultante anulare medio per metro di galleria vale:

$$N_\theta = p \cdot r_m$$

quindi:

$$N_\theta = 300 \cdot 2.35 = 705\ kN/m$$

Per un anello largo 1,50 m:

$$N_{anello} = 705 \cdot 1.50 = 1057.5\ kN$$

Tensione media di compressione nel rivestimento

$$\sigma_c = \frac{N_\theta}{A}$$
$$\sigma_c = \frac{705}{0.30} = 2350\ kN/m^2 = 2.35\ MPa$$

Il valore medio di compressione anulare è quindi modesto rispetto a un calcestruzzo prefabbricato ad alte prestazioni.

5. Ovalizzazione e flessione dell'anello

Il punto cruciale non è la sola compressione media, ma la **flessione da ovalizzazione**, dovuta a:

- pressione non uniforme;
- differente rigidezza dei conci;
- deformazione del terreno;
- giunti;
- imperfetta omogeneità dell'iniezione del vuoto anulare;
- sovraccarichi locali;
- tolleranze geometriche.

Per una stima di sicurezza di massima, assumo:

$$M_{Ed} = 60\ kNm/m$$

6. Caratteristiche della sezione equivalente

Per metro di sviluppo longitudinale, trattando il rivestimento come sezione rettangolare di spessore $t = 0.30\,m$:

Momento di inerzia

$$I = \frac{1 \cdot t^3}{12} = \frac{0.30^3}{12} = 0.00225\,m^4$$

Modulo resistente

$$W = \frac{I}{t/2} = \frac{0.00225}{0.15} = 0.015\,m^3$$

Tensione flessionale

$$\sigma_f = \frac{M_{Ed}}{W}$$
$$\sigma_f = \frac{60}{0.015} = 4000\,kN/m^2 = 4.0\,MPa$$

Tensioni estreme combinate

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$
$$\sigma = 2.35 \pm 4.0\,MPa$$

quindi:

- **fibra più compressa**

$$\sigma_{max} = 6.35\,MPa$$

- **fibra opposta**

$$\sigma_{min} = -1.65\,MPa$$

Questo risultato è tecnicamente molto importante: l'anello non può essere pensato come elemento solo compresso. Serve **armatura diffusa** e corretta progettazione dei giunti.

7. Scelta dei materiali

Calcestruzzo prefabbricato

Assumo:

$$C50/60$$

con vantaggi in termini di:

- durabilità;
- bassa permeabilità;
- buona resistenza a compressione;
- migliore compatibilità con inglobamento di sensori.

Per un valore di riferimento:

- resistenza cilindrica caratteristica:

$$f_{ck} = 50\ MPa$$

- resistenza media:

$$f_{cm} \approx 58\ MPa$$

Acciaio di armatura

$$B450C$$

Tensione di progetto acciaio

Assumendo:

$$\gamma_s = 1.15$$
$$f_{yd} = \frac{450}{1.15} \approx 391\ MPa$$

8. Verifica semplificata a presso-flessione del concio

Per una lettura di massima conservativa, assumo che la trazione venga assorbita dall'armatura diffusa.

Momento resistente richiesto per metro

$$M_{req} = 60\ kNm/m$$

Assumo altezza utile:

$$d \approx 0.25\,m$$

e braccio interno semplificato:

$$z \approx 0.9d = 0.225\,m$$

L'armatura resistente richiesta per metro è:

$$A_s = \frac{M_{req}}{f_{yd} \cdot z}$$

$$A_s = \frac{60 \cdot 10^6}{391 \cdot 225} \approx 681\,mm^2/m$$

Per sicurezza e per esigenze di controllo fessurativo, è opportuno salire.

Scelta di massima

Per ciascuna faccia del concio:

$$A_s, prov \approx 800 \div 1000\,mm^2/m$$

sia all'intradosso sia all'estradosso, con incremento locale ai bordi di giunto.

Una soluzione di primo orientamento può essere:

- doppia rete con barre Ø12/15 cm su entrambe le facce, da verificare in dettaglio in esecutivo.

9. Verifica di massima al taglio locale del concio

Il taglio globale anulare è in genere meno gravoso della pressoflessione globale, ma i **tagli locali** possono diventare importanti in:

- bordi di giunto;
- sedi bulloni;
- punti di appoggio in montaggio;
- zone di sollevamento.

Per un controllo semplificato, assumo un taglio locale di progetto per metro:

$$V_{Ed} = 80\ kN/m$$

Tensione tangenziale media:

$$\tau = \frac{V}{b \cdot t}$$
$$\tau = \frac{80}{1 \cdot 0.30} = 267\ kPa = 0.267\ MPa$$

Valore basso come media, ma il problema vero resta la **concentrazione locale**. Da qui la necessità di:

- staffatura locale nei bordi;
- armature di cucitura ai giunti;
- rinforzi in corrispondenza dei fori e inserti.

10. Verifica locale dei giunti

I giunti tra conci devono assicurare contemporaneamente:

- trasferimento di compressione;
- trasferimento di taglio;
- controllo della rotazione;
- tenuta idraulica.

Compressione media al giunto

Se il carico anulare totale su un concio è circa:

$$N_{concio} \approx \frac{1057.5}{6} = 176\ kN$$

questo valore cresce nei conci più sollecitati per ovalizzazione. Assumo cautelativamente:

$$N_{j,Ed} = 300\ kN$$

Se l'area compressa di contatto effettivo al giunto è ad esempio:

$$A_j = 0.10\ m^2$$

si ha:

$$\sigma_j = \frac{300}{0.10} = 3.0\ MPa$$

Valore compatibile con il cls, ma da controllare rispetto a:

- eccentricità;
- imperfezioni;
- schiacciamento locale;
- tolleranze di posa.

Taglio di giunto

Assumo:

$$V_{j,Ed} = 50\ kN$$

Il taglio può essere trasferito mediante:

- bulloni/spinotti;
- attrito da compressione;
- chiavi di taglio geometriche.

Con coefficiente di attrito conservativo:

$$\mu = 0.5$$

la sola resistenza per attrito sarebbe:

$$V_{Rd,attr} = \mu N = 0.5 \cdot 300 = 150\ kN$$

quindi superiore al taglio ipotizzato. Tuttavia in progetto reale non si affida mai tutto al solo attrito teorico: servono dispositivi meccanici e dettagli costruttivi robusti.

11. Verifica dei bulloni/spinotti di collegamento

Assumo due spinotti/bulloni per giunto, con ripartizione del taglio:

$$V_{perno} = \frac{50}{2} = 25\ kN$$

È un valore modesto per un perno in acciaio strutturale di diametro medio, ma il controllo vero riguarda:

- rifollamento del cls;
- schiacciamento locale;
- eccentricità;
- fatica nei cicli di montaggio;
- allineamento reale.

12. Verifica della fase di sollevamento del concio

Questa è una delle fasi più delicate.

Assumo un concio di peso:

Volume singolo concio

Area anulare del rivestimento:

$$A_{ring} = \pi(r_e^2 - r_i^2)$$

dove

$$r_e = 2.50\ m, r_i = 2.20\ m$$
$$A_{ring} = \pi(6.25 - 4.84) = \pi \cdot 1.41 \approx 4.43\ m^2$$

Volume anello:

$$V_{ring} = 4.43 \cdot 1.50 = 6.65\ m^3$$

Volume per concio:

$$V_{concio} \approx \frac{6.65}{6} = 1.11\ m^3$$

Peso specifico cls:

$$\gamma_c = 25\ kN/m^3$$

Peso concio:

$$G_{concio} = 1.11 \cdot 25 = 27.8\ kN$$

Con coefficiente dinamico di montaggio:

$$\psi_d = 1.30$$

Carico di progetto di sollevamento:

$$G_d = 27.8 \cdot 1.30 = 36.1\ kN$$

Se il concio è sollevato con due inserti:

$$N_{insert} = 18.05\ kN$$

Questo valore è gestibile, ma il problema non è solo la forza: è il **momento locale di spacco** nella zona di ancoraggio.

Perciò servono:

- rinforzi di bursting;
- staffe chiuse;
- armature di cucitura;
- dettagli costruttivi certificati per inserti.

13. Verifica qualitativa della sicurezza globale

A livello di massima, i risultati mostrano:

- compressione media anulare: moderata;
- sollecitazione di flessione da ovalizzazione: significativa;
- necessità di armatura diffusa: certa;
- necessità di rinforzi di giunto: certa;
- sicurezza della sezione in compressione: buona;
- criticità vere: giunti, tolleranze, montaggio, infiltrazioni, contatto terreno-rivestimento.

Il comportamento globale dell'anello dipende in modo decisivo dalla **rigidezza dei giunti** e dall'**interazione terreno-struttura**, che in esecutivo devono essere modellate con FEM dedicato.

14. Sensorizzazione FBG dei conci

I sensori a fibra ottica **FBG** vanno previsti già in stabilimento.

Posizionamento raccomandato per anello

- un sensore all'intradosso in chiave;
- un sensore all'estradosso in chiave;
- sensori nei due reni;
- sensori ai piedritti;
- sensori presso almeno due giunti opposti;
- sensori di temperatura;
- eventuali sensori di umidità/infiltrazione in tratte campione.

Grandezze misurate

- deformazioni circonferenziali;
- deformazioni longitudinali;
- gradienti termici;
- apertura/chiusura dei giunti;
- segnali precoci di fessurazione.

Legge fisica

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T$$

Questo consente di separare, con opportuna compensazione, contributi deformativi e termici.

15. Digital Twin della galleria

Il **Digital Twin** non è un disegno 3D.

È la replica tecnico-numerica evolutiva del rivestimento.

Contiene:

- geometria reale degli anelli;
- caratteristiche dei conci;

- posizione dei giunti;
- dati di montaggio;
- dati sensoriali;
- cronologia deformativa;
- cronologia idraulica.

Riceve nel tempo il vettore dati:

$$D(t) = \{\varepsilon(t), T(t), \Delta g(t), u(t), q_h(t)\}$$

dove:

- ε: deformazioni;
- T: temperatura;
- Δg: apertura giunti;
- u: pressione idrica;
- q_h: stato idraulico interno.

Il confronto tra reale e modello è:

$$R(t) = D_{reale}(t) - D_{modello}(t)$$

Se $R(t)$cresce in modo sistematico, il sistema segnala una deriva comportamentale.

16. Intelligenza Artificiale e manutenzione predittiva

La IA non sostituisce il progettista. Lo rende più capace di leggere i segnali deboli.

Funzione concettuale

$$P(danno) = f(\varepsilon, T, u, \Delta g, tempo)$$

La IA consente di individuare:

- ovalizzazioni lente;
- andamento non coerente di anelli contigui;
- crescita anomala di deformazioni in chiave;
- progressiva perdita di contatto dietro il rivestimento;

- infiltrazioni iniziali;
- degrado localizzato dei giunti.

Il vantaggio decisivo è che si passa da una manutenzione ispettiva a una **manutenzione predittiva**.

17. Sicurezza e coefficienti di progetto

In questo studio di massima la sicurezza è stata affrontata in modo ingegneristicamente prudente mediante:

- pressione esterna equivalente cautelativa;
- momento di ovalizzazione significativo;
- coefficiente dinamico di montaggio;
- acciaio considerato con tensione di progetto;
- richiesta di armatura superiore al minimo meccanico.

In esecutivo la sicurezza dovrà essere verificata con:

- combinazioni geotecniche e strutturali complete;
- modelli a giunti deformabili;
- analisi delle fasi di montaggio;
- verifica della tenuta idraulica;
- analisi di durabilità;
- controllo della robustezza locale.

18. Sintesi progettuale

Per la galleria idraulica di diametro 4,40 m, l'impostazione di massima proposta porta a:

- spessore rivestimento:

$$t = 30\ cm$$

- larghezza anello:

- concio prefabbricato in cls:

$$C50/60$$

- armatura diffusa su entrambe le facce:

$$A_s \approx 800 \div 1000\, mm^2/m$$

rinforzi locali:
bordi giunto, inserti di montaggio, sedi spinotti;

- monitoraggio:
  FBG in chiave, reni, piedritti, giunti;
- piattaforma:
  Digital Twin + analisi IA.

19. Conclusione finale divulgativa estesa

Il progetto del rivestimento di una galleria idraulica con conci prefabbricati mostra con grande chiarezza che l'ingegneria moderna non può più fermarsi alla sola robustezza iniziale dell'opera.

Per molti anni si è pensato al rivestimento come a una barriera resistente: un anello capace di opporsi al terreno, all'acqua e al tempo grazie soltanto alla forza del calcestruzzo armato.

Questa base resta fondamentale.

Ma oggi sappiamo che non basta.

Una galleria non è immobile.

Non è silenziosa.

Non è un'opera che, una volta collaudata, smette di cambiare.

Al contrario, continua a vivere ogni giorno:

- mentre il terreno si assesta;
- mentre la falda varia;
- mentre l'acqua modifica pressioni e condizioni interne;
- mentre i giunti reagiscono in modo differente;
- mentre il materiale evolve lentamente.

Per questo il concio prefabbricato moderno non deve essere soltanto forte.

Deve essere anche intelligente.

Deve conservare memoria.

Deve trasmettere dati.

Deve aiutare il progettista e il gestore a capire come l’opera sta realmente vivendo.

I sensori a fibra ottica permettono di ascoltare il rivestimento dall’interno.

Il Digital Twin trasforma quella voce in modello tecnico.

L’Intelligenza Artificiale aiuta a riconoscere segnali minimi prima che diventino problema evidente.

Ed è proprio qui che si compie il vero salto culturale.

La sicurezza non nasce solo dalla sezione ben dimensionata.

Nasce dalla capacità dell’opera di continuare a raccontare il proprio stato nel tempo.

Il collaudo, allora, non è più la fine.

È l’inizio della vera conoscenza della galleria.

Questa è la direzione più avanzata dell’ingegneria sotterranea:

non soltanto costruire un rivestimento resistente, ma costruire un rivestimento capace di essere ascoltato, interpretato e protetto per tutta la sua vita utile.

Chiusura finale

Una galleria moderna
non deve solo opporsi al terreno e all’acqua.
Deve anche parlare.

E la vera sicurezza nasce quando
siamo capaci di ascoltarla.

Andrea Dell'Erba & Diego Dell'Erba

L'attività professionale congiunta degli Ingegneri Diego Dell'Erba e Andrea Dell'Erba si sviluppa nel campo dell'ingegneria civile, strutturale e geotecnica, con particolare riferimento alla progettazione, verifica e controllo di opere civili e infrastrutturali.

La competenza integrata deriva dall'unione tra consolidata esperienza tecnico-operativa e moderna capacità di modellazione progettuale, con attenzione ai processi evolutivi dell'ingegneria contemporanea.

Gli ambiti principali di attività comprendono: • opere strutturali civili e infrastrutturali • ponti, cavalcavia e viadotti • fondazioni speciali e geotecnica applicata • consolidamenti e opere territoriali • gestione tecnica del cantiere • monitoraggio strutturale avanzato

Particolare orientamento è rivolto all'impiego di strumenti innovativi quali: • Digital Twin • sensori a fibra ottica FBG • modelli di manutenzione predittiva • sistemi di Intelligenza Artificiale

L'impostazione professionale è orientata a una ingegneria capace di integrare progettazione, controllo continuo e lettura intelligente del comportamento dell'opera nel tempo.