

The application of sustainability criteria to the segmental lining life cycle: a matrix analysis of questions and technical and design solutions.

Applicazione dei criteri di sostenibilità nel ciclo vita del rivestimento in conci prefabbricati: una analisi matriciale di domande e soluzioni tecniche e progettuali.

Ludovica Pizzarotti¹, Filomena Pomilio², Anita Di Giulio³

¹ *Geotechnical Engineer, Pro Iter S.r.l - Member of SIG WG2 Task Group on Sustainability*

² *Architect and Head of Env. Department, Pro Iter S.r.l - Coordinator of SIG WG2 Task Group on Sustainability*

³ *Engineer and co-founder, GEEG S.r.l - Member of SIG WG2 Task Group on Sustainability*

ABSTRACT: In the “green” debate, the need for tangible solutions in the design and construction of sustainable infrastructures is increasingly evident. As part of its activities, Working Group 2 - Research of the Italian Tunnel Society has set the goal of collecting examples, indications and ways of maximizing sustainability through some technical-design approaches to infrastructures, starting from the analysis of specific aspects of mechanized tunnelling, such as precast segmental lining. The present work examines the recurring topics in the evaluation of segmental lining sustainability and a few consolidated as well as innovative solutions. By applying an analytical method based on two protocol models of sustainability in infrastructures (Envision® and Breeam®), the main problems are identified and coupled with the main answers which can be currently identified in the decisional process concerning the segmental lining (from design to service), as well as shortcomings or potential developments. / Nel panorama del dibattito “green” è sempre più evidente la necessità di risposte concrete nella progettazione e realizzazione di infrastrutture sostenibili. Nell’ambito delle proprie attività, il Gruppo di Lavoro 2 - Ricerca della Società Italiana Gallerie si è dato l’obiettivo di raccogliere esempi, indicazioni e modalità di massimizzazione della sostenibilità mediante alcuni approcci tecnico-progettuali alle infrastrutture, partendo dall’analisi di aspetti specifici dello scavo meccanizzato di gallerie, quale il rivestimento in conci prefabbricati. Il lavoro esamina i temi ricorrenti nella valutazione di sostenibilità del rivestimento e le risposte consolidate oppure più innovative. Applicando un metodo analitico, che parte da due modelli dei protocolli per la sostenibilità delle infrastrutture (Envision e Breeam), le principali problematiche di sostenibilità vengono individuate e affiancate alle principali soluzioni disponibili oggi nella gestione delle scelte sul rivestimento in conci (dalla progettazione all’utilizzo), così come a eventuali carenze o potenziali sviluppi.

KEYWORDS: segmental lining; mechanized tunneling; sustainability; Breeam; Envision; technical and design solutions / rivestimento in conci prefabbricati; scavo meccanizzato; gallerie; sostenibilità; Breeam; Envision; soluzioni tecniche e progettuali

1 INTRODUZIONE

Il dibattito sulla necessità di ridurre l’impatto antropico sull’ambiente è in corso almeno dal 1992, anno del primo Earth Summit, ma i più grandi passi verso la ricerca di soluzioni di sostenibilità concrete e quantificabili sono stati fatti dal 2015 in poi, in seguito all’accordo di Parigi e alla definizione dell’Agenda 2030 da parte delle Nazioni Unite; si può quindi affermare che il quadro di riferimento che caratterizza i lavori in ambito della sostenibilità delle opere di ingegneria civile ha conosciuto un fortissimo sviluppo in poco più di un decennio, risultando a oggi così vasto da essere a volte dispersivo, perché in continua evoluzione. In questo contesto, la Società Italiana Gallerie (SIG) è attiva a livello nazionale e internazionale per promuovere un approccio al tunneling attento alla sostenibilità e per fornire ai professionisti strumenti di lavoro che li guidino in questa direzione. In particolare, il Gruppo di Lavoro 2 - Ricerca (WG2) della SIG si è dato l’obiettivo di raccogliere e

organizzare utili esempi, indicazioni e modalità per migliorare la sostenibilità delle opere in sotterraneo attraverso alcuni approcci progettuali.

Il lavoro qui presentato è una sintesi preliminare dell’attività in corso e propone una disamina accurata ma non troppo dispersiva sia dei temi ricorrenti nella valutazione di sostenibilità delle infrastrutture sia di possibili soluzioni tecniche e progettuali con diverso grado di innovazione, partendo dall’analisi di un aspetto specifico dello scavo meccanizzato di gallerie, quale il rivestimento in conci prefabbricati (segmental lining).

La chiave di lettura scelta è quella dell’applicazione di un metodo analitico che parte da due sistemi di rating della sostenibilità di opere civili, Envision e Breeam, che individuano criteri che la progettazione deve seguire e/o a cui deve tendere, comprendendo un ricco ventaglio di temi (sociali, economici, climatici, energetici, naturalistici, ecc.) e rivolti concretamente a progettisti, ma anche a imprese, amministrazioni pubbliche e cittadini.

Ai requisiti di sostenibilità elencati nei protocolli il lavoro del WG affianca le principali risposte che si individuano oggi nella gestione dei progetti infrastrutturali (dalla progettazione all'utilizzo), così come eventuali carenze o potenzialità di proposte, ma non si configura come un'analisi di prodotto, peraltro già costituita dalle certificazioni EPD già in uso per i conci.

L'impianto alla base di questo lavoro prende spunto da quanto già impostato in ambito internazionale dal WG14 dell'International Tunneling Association (ITA), seppure su un tema più ampio quale la sostenibilità negli scavi meccanizzati.

2 INQUADRAMENTO E METODO

2.1 *Analisi delle domande di ENVISION e BREEAM riferite alle opere in sotterraneo*

I protocolli di assessment della sostenibilità costituiscono oggi un importante e sempre più indispensabile riferimento nella progettazione.

Il presente lavoro parte dalla disamina dei criteri/indicatori (o delle domande) di sostenibilità poste dai due protocolli maggiormente diffusi e utilizzati nell'ambito della progettazione infrastrutturale: Envision e Breeam. Entrambi fanno riferimento alla sostenibilità nella progettazione ad ampio raggio, ossia dal punto di vista sociale (miglioramento della qualità della vita), della governance (rappresentatività degli stakeholders e delle comunità), economico (ottimizzazione delle risorse economiche impiegate), ambientale (risparmio energetico e di risorse, riduzione degli impatti), paesaggistico e naturalistico (tutela e miglioramento dei patrimoni, degli habitat ed ecosistemi) e di resilienza (risposta e adattabilità ai rischi e ai cambiamenti climatici).

I numerosi indicatori vengono qui applicati alla valutazione di sostenibilità dell'utilizzo dei conci prefabbricati nelle opere in sotterraneo, quindi a un tema specifico dello scavo meccanizzato. L'obiettivo di ridurre il campo di interesse rispetto all'ampio quadro di riferimento non vuole essere quello di sostituire o ricalcare la certificazione EPD dei conci ma è legato alla possibilità di declinare alcune applicazioni nella pratica e di costruire una serie di indicazioni utili e attuabili per la gestione di un progetto infrastrutturale nelle sue diverse fasi.

2.2 *Analisi dei due protocolli*

I sistemi di rating Envision e Breeam sono costituiti da una serie di indicatori, a ciascuno dei quali è assegnato un punteggio valutabile attraverso una lista di domande o criteri da controllare, verificare e monitorare. Tali indicatori sono suddivisi in categorie, ognuna con un peso diverso in termini di punteggio.

Envision, nato negli USA nel 2012 dalla collaborazione tra l'Institute for Sustainable Infrastructure e lo Zofnass Program for Sustainable Infrastructure, è costituito da 64 crediti suddivisi nelle categorie: "Quality of life", "Leadership", "Resources Allocation", "Natural world", "Climate and Resilience", ai quali corrispondono circa 260 domande di valutazione.

Breeam, sviluppato in Inghilterra nel 1988 dalla Building Research Establishment (BRE), è composto da circa 250 domande o criteri di valutazione, distribuiti nelle categorie: "Management", "Resilience", "Stakeholders", "Land Use and Ecology", "Landscape and Historical Environment", "Pollution", "Resources" e "Transport".

Il rating assegnato da ciascun protocollo, cioè il risultato dell'assessment, è la somma dalla valutazione attribuita per ciascun credito/quesito sul massimo del punteggio applicabile.

Nonostante entrambi i protocolli partano da presupposti e abbiano obiettivi simili il loro confronto non è però immediato, a causa della diversa suddivisione in categorie e del diverso peso a esse associato.

L'analisi è stata quindi avviata con la costruzione di una check list complessiva, che raccogliesse le domande di entrambi i protocolli e permettesse di individuare e confrontare gli aspetti più rilevanti per ciascuno di essi, nonché quelli più direttamente attinenti all'utilizzo dei conci prefabbricati.

Dalle matrici di affiancamento prodotte, emerge come entrambi i protocolli affrontino i temi della sostenibilità senza tralasciare alcun aspetto, ma attribuendo i pesi maggiori alla gestione del progetto, all'efficienza allocativa e all'utilizzo delle risorse.

I criteri più attinenti al segmental lining risultano essere quelli che riguardano la pianificazione in ottica sostenibile dalla localizzazione delle opere alla gestione del fine vita, il ciclo di vita dei materiali, l'utilizzo delle risorse (acqua, suolo, energia) e la riduzione degli impatti in fase costruttiva e di esercizio.

2.3 *Categorie di sintesi dei due protocolli*

È stato svolto un ulteriore passaggio per poter confrontare Envision e Breeam in maniera più diretta e controllabile e poter avere un riscontro anche in termini quantitativi sull'importanza che essi associano alle diverse categorie, dato che la check list di cui al Paragrafo 2.2, incrocia tutti i criteri di valutazione dei due protocolli ma si limita per il momento a una comparazione puramente qualitativa. Si è operata, quindi, una riclassificazione delle domande di sostenibilità all'interno delle seguenti categorie di sintesi o clusters:

- 1) carbon reduction
- 2) circular economy
- 3) community wellbeing
- 4) cultural resources

- 5) economics and costs
- 6) energy consumption - construction
- 7) energy consumption - operation
- 8) equality
- 9) flood management
- 10) pollutants management
- 11) risk and resilience
- 12) sites, land and animals
- 13) stakeholder engagement
- 14) sustainability plan
- 15) sustainability for monitoring and maintenance
- 16) water resources
- 17) wellbeing during construction

Ogni domanda di entrambi i protocolli è stata collegata a una sola delle diciassette categorie a seconda della maggior pertinenza, e la somma del rating dei parametri, così raggruppati, è stata calcolata per ogni categoria. In questo modo è stato possibile confrontare il peso di ciascuna categoria per Envision e Breeam.

I risultati ottenuti sono espressi nel grafico di Figura 1.

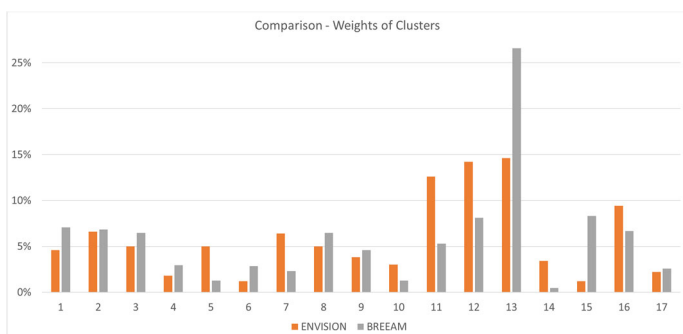


Figure 1. Distribution of Envision and Breeam protocols questions within the identified categories / Distribuzione delle domande dei protocolli Envision e Breeam all'interno delle categorie individuate.

Il confronto mette in rilievo le analogie tra i protocolli, che attribuiscono lo stesso peso alla categoria *circular economy*, e pesi molto simili per *carbon reduction*, *community wellbeing*, *equality*, *cultural resources*, *water resources* e *wellbeing during construction*.

Le differenze risiedono invece nelle categorie *stakeholder engagement*, a cui Breeam assegna il 27% mentre Envision il 15%, *sites, land and animals* (Breeam 8% vs Envision 14%) e *risk and resilience* (Breeam 5% vs Envision 13%).

Un'altra interessante modalità di confronto si ottiene spostando il focus sul ciclo di vita dell'opera. A questo proposito ciascuna domanda dei protocolli è stata assegnata a una particolare fase tra *planning*, *construction*, *operation and maintenance*, ottenendo le distribuzioni presentate in Figura 4. Questa mostra che la fase maggiormente coinvolta nell'analisi di

sostenibilità è certamente quella della pianificazione e che il protocollo Breeam attribuisce grande importanza anche alla fase di costruzione, contrariamente a Envision, per il quale la fase operativa assume maggior peso.

Infine, la scarsa attenzione attribuita alla manutenzione da entrambi i protocolli va parzialmente in contrasto con il concetto di durata dell'opera come importante parametro di sostenibilità.

2.4 Strumenti a disposizione

Nel portare avanti l'attività di ricerca, che è qui presentata in una sua fase preliminare, il WG2 si avvale di diversi strumenti di lavoro.

Innanzitutto, si è fatto riferimento alla letteratura di settore, includendo anche i contributi proposti da molti professionisti in recenti convegni sulla sostenibilità delle gallerie e dei conci in particolare, segno della vitalità della ricerca e dell'innovazione su questo tema nel mondo dell'ingegneria civile. Inoltre, l'esperienza professionale degli iscritti alla SIG è stata indagata per mezzo di un sondaggio, a oggi in corso, che sta già fornendo preziosi spunti per individuare proposte e soluzioni per migliorare la sostenibilità delle opere.

3 DOMANDE E SOLUZIONI PER IL RIVESTIMENTO IN CONCI PREFABBRICATI

3.1 Risultati preliminari del sondaggio

Il questionario condotto ha lo scopo di aiutare il WG2 a costruire un *data base* esaustivo, aggiungendo alle informazioni reperibili dalla bibliografia e dall'esperienza dei singoli membri del gruppo, soluzioni sostenibili applicabili al tema del rivestimento in conci che possano fungere da *best practices* ed essere un punto di partenza, una guida, per un'impostazione più sostenibile dei progetti in avviamento.

Il questionario è impostato secondo la suddivisione in cluster descritta al Paragrafo 2.3. Per ogni cluster, si richiede di descrivere una soluzione, di qualsiasi natura (tecnico-progettuale, gestionale, produttiva, ecc.) volta all'ottimizzazione in termini di sostenibilità del rivestimento in conci e di specificare in che fase di vita del progetto è adottabile (progettazione, produzione, costruzione, servizio e manutenzione, fine vita), qual è l'impatto generale che può avere sul progetto, se adottata, specificando un punteggio da 0 (nessuno/minimo impatto) a 5 (forte impatto) e infine qual è il livello di applicabilità della soluzione proposta specificando un punteggio da 0 (innovazione/mai adottata) a 5 (sempre applicabile).

A oggi i contributi ricevuti tramite la compilazione del sondaggio non sono ancora sufficienti per poter condurre un'analisi completa e rappresentativa. Ci si

limita quindi a descrivere che tipo di risultati si potranno ottenere una volta popolati i dati a disposizione e si riportano i primi risultati in termini di tendenza generale.

Per prima cosa si faranno delle valutazioni sulla ragione sociale di appartenenza dei contribuenti, in base alle categorie che seguono, per capire chi sono i soggetti maggiormente coinvolti sul tema in oggetto: clienti, imprese di costruzioni, società di progettazione, fornitori, figure accademiche e produttori.

Successivamente si valuteranno le risposte in termini di:

1. contenuto, integrandole nel data base;
2. specificità, cioè se la risposta è generica e quindi associabile a più cluster o se è circoscritta a un cluster specifico;
3. distribuzione delle risposte per cluster, che può essere indice non solo del campo d'azione comune ma anche di aree tematiche poco trattate o addirittura incongruenti o non associabili all'oggetto di studio (Figura 2, linea tratteggiata);
4. distribuzione della frequenza di adozione delle soluzioni per fase progettuale per cluster, indice di quando si devono prevedere degli interventi in termini di sostenibilità;
5. distribuzione della frequenza media di adozione delle soluzioni per fase progettuale, specchio della finestra temporale entro la quale si concentra a oggi il maggior sforzo in termini di sostenibilità, di dove c'è ancora margine di miglioramento/sviluppo o di dove non c'è possibilità di azione per il caso in oggetto (Figura 3);
6. confronto della distribuzione media al punto 5, con la distribuzione delle domande di sostenibilità rispetto alle fasi di vita descritte al Paragrafo 2.3, per capire se la distribuzione effettiva dei pesi delle fasi rispecchia quella dei due protocolli analizzati (Figura 4);
7. medie per cluster dei punteggi relativi all'impatto, da cui si evince se le soluzioni proposte, se adottate, sono significative in termini di incremento della sostenibilità del progetto;
8. distribuzione dei punteggi relativi all'impatto;
9. medie per cluster dei punteggi relativi all'applicabilità, da cui si evince se le soluzioni proposte, sono consolidate e facilmente adottabili o se sono proposte innovative che necessitano di essere collaudate;
10. distribuzione dei punteggi relativi all'applicabilità;
11. medie Combinate per cluster dei due punteggi, da cui si evince il peso globale delle soluzioni (massimo 10 punti, 5 impatto + 5 applicabilità). Valori elevati saranno indice di un'area su cui è importante investire per rendere il progetto più sostenibile (Figura 2, grafico a barre).
12. Confronto delle medie combinate con la distribuzione dei pesi dei cluster dei protocolli Envision e Breeam descritta al Paragrafo 2.3 e

rappresentata in Figura 1, per capire se la distribuzione effettiva dei pesi dei cluster rispecchia quella dei due protocolli analizzati;

13. distribuzione delle risposte per Categorie Envision;
14. distribuzione delle risposte per Categorie Breeam;
15. confronto delle Distribuzioni delle risposte per cluster, Categorie Envision e Breeam;

Queste ultime tre valutazioni (punti 13-14-15) serviranno ad avere un quadro di maggior dettaglio su quali siano le aree di lavoro principali e quali invece ancora poco esplorate.

Di seguito si riportano i grafici dei primi risultati affiancati da un commento sintetico.

La Figura 2, sebbene mostri un quadro del tutto preliminare, mette già in evidenza come su un campione totale di 187 risposte (11 risposte x 17 cluster), ci sia una certa confidenza nell'adozione di soluzioni che in media possono fare la differenza: quasi tutti i cluster hanno punteggi superiori alla media (linea tratteggiata rossa in figura). Inoltre, la distribuzione delle risposte sembrerebbe confermare i campi d'azione principali delineati ai paragrafi precedenti (*Carbon Reduction, Circular Economy, Economics and Costs e Energy Consumption during Construction*).

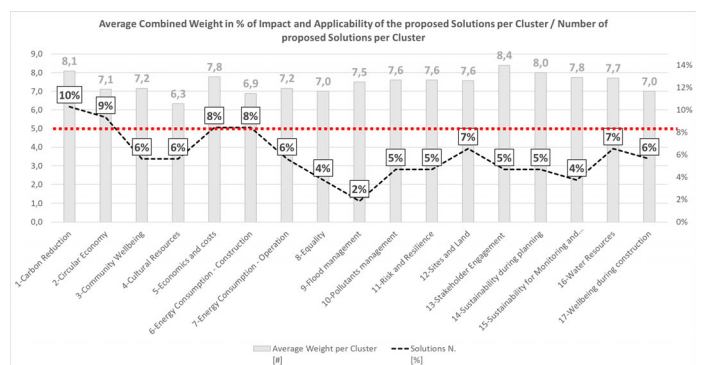


Figure 2. Average combined weight (Impact+Applicability) per cluster and distribution of the solutions per cluster / Media combinata dei punteggi (Impatto+Applicabilità) per cluster e distribuzione delle risposte per cluster.

La Figura 3, mostra come le soluzioni sembrerebbero applicabili, o è preferibile che si inizino ad applicare, dalle prime fasi di vita del progetto, con un'enfasi particolare sulle fasi intermedie di progettazione (*Preliminary e Final Design*) e sulla fase di costruzione dell'opera (*Build and Commission*). Questo dato rispecchia in effetti la buona prassi per cui un progetto è tanto più sostenibile quanto più si è svolta una buona pianificazione in questo senso e si sono attuate delle misure già a partire dalla fase di studio di fattibilità dell'intervento e per tutte quelle fasi che possono avere un forte impatto, come per esempio le attività di produzione e di costruzione.

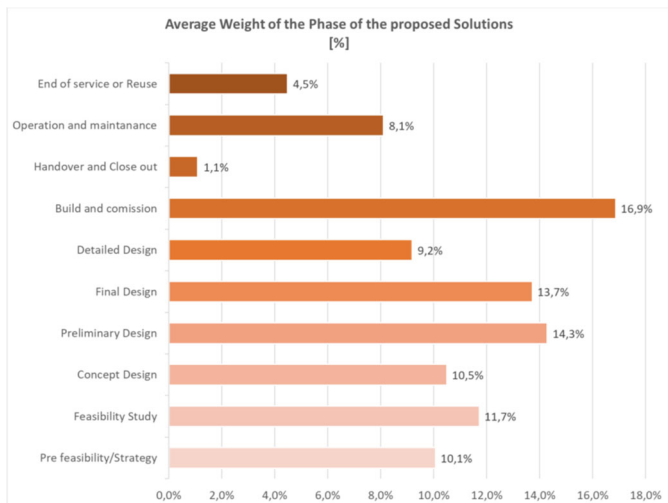


Figure 3. Average weight distribution of the adoption of the solutions per phase / Distribuzione della frequenza media di adozione delle soluzioni per fase progettuale.

Per ultimo si riporta in Figura 4 il confronto tra la frequenza media di adozione delle soluzioni ricevute e la distribuzione delle domande di sostenibilità rispetto alle fasi di vita del progetto dei protocolli Envision e Breeam. In questo caso, nonostante il numero limitato di dati analizzati, c'è un'evidenza marcata di quanto la fase di pianificazione, intesa in questo caso come la somma delle fasi dalla prefattibilità alla progettazione esecutiva, abbia un peso maggiore rispetto alle altre due (Costruzione e Servizio e Manutenzione) e sia in linea con le distribuzioni dei due protocolli.

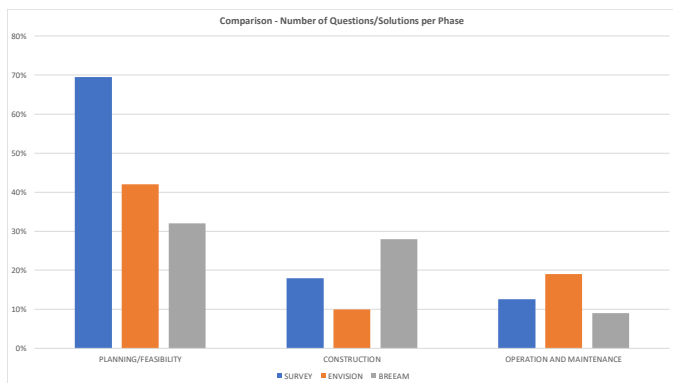


Figure 4. Comparison of the distribution of the proposed solutions and the sustainability questions of the protocols Envision and Breeam per project phase / Confronto delle distribuzioni delle risposte del sondaggio e delle domande di sostenibilità dei protocolli Envision e Breeam rispetto alle fasi di vita del progetto.

3.2 Soluzioni di sostenibilità per le categorie Envision

Questo paragrafo raccoglie una serie di soluzioni tecniche e progettuali nell'utilizzo dei conci prefabbricati che, se messe in pratica, possono migliorare la sostenibilità di un'opera in sotterraneo in termini di rating secondo il protocollo Envision. Si è cercato di

legare ciascuna soluzione proposta a una specifica categoria, ma alcune di esse possono influire su più aspetti interconnessi, tanto nella realtà quanto nel sistema di crediti.

3.2.1 Quality of life (Wellbeing, Mobility, Community)

In tema di qualità della vita o *wellbeing*, l'utilizzo dei conci prefabbricati dimostra attenzione alla minimizzazione delle problematiche temporanee associate alle attività della fase di costruzione e si riflette positivamente sulla sicurezza degli operai, che non si troveranno a dover eseguire lunghe lavorazioni in prossimità del fronte come nel caso dell'installazione di un rivestimento tradizionale.

Il rivestimento in conci si traduce in un aumento del trasporto ferroviario dei prodotti e una riduzione dei trasporti su gomma, mentre optare per una produzione dei conci nei pressi del cantiere permette di ridurre i trasporti, con conseguente riduzione del passaggio dai mezzi e dell'inquinamento dell'aria e acustico, a vantaggio delle comunità interessate.

3.2.2 Leadership (Collaboration, Planning, Economy)

Pianificare interventi sostenibili, ossia incorporare il principio dello sviluppo sostenibile nella selezione/identificazione del progetto migliore per la comunità presente e futura, è il cardine del sistema di rating Envision. L'attuazione di soluzioni innovative per l'utilizzo di conci risponde soprattutto ai requisiti di *collaboration* perché richiede il coinvolgimento di molti attori e la formazione di team competenti e preparati nelle analisi ambientali/economiche, in grado di riconsiderare le tradizionali filiere produttive dei conci, l'approvvigionamento delle materie prime e i possibili percorsi di riciclo.

In generale, un processo premiante non dovrebbe prescindere dall'esecuzione di *life cycle assessments* (LCA) che permettano di quantificare la sostenibilità di diverse alternative progettuali, possibilmente nel quadro di riferimento *cradle to grave*. A questo scopo, gli standards CPR (EU) N° 305/11, UNI EN 15804 e PAS 2080 sono strumenti che, sebbene non riferiti direttamente ai conci, possono guidare queste valutazioni.

Le più diffuse soluzioni innovative riguardano sia i compositi cementizi, che possono includere materiali alternativi e riciclati, sia il sistema di armatura e rinforzo; alcune di queste sono elencate nei paragrafi seguenti, altre sono:

- pianificare la produzione con i dati reali di avanzamento della TBM simulando gli impatti sugli stock, evitando problemi di fermo della TBM dovuta approvvigionamento dei conci o, al contrario, l'overstock;
- scegliere di riconvertire/riutilizzare le aree di prefabbricazione e di prevedere insediamenti di

produzione conci completamente smontabili e riutilizzabili altrove (Pupa, 2023);

- creare un efficiente processo di economia circolare, per esempio riutilizzando come aggregato le terre e rocce da scavo prodotte per realizzare l'opera, anche industrializzando il processo di identificazione dello smarino;
- utilizzare gabbie d'armatura dei conci prefabbricati realizzate con elementi di base elettrosaldati o con sistemi misti (armatura tradizionale e fibre metalliche), con diversi vantaggi come il ridotto consumo di acciaio, la velocità di assemblaggio, la riduzione dei margini di errore nel posizionamento dei ferri, la facilità dei controlli, l'assenza di nodi congestionati di barre, la maggiore durabilità;
- utilizzare barre in vetroresina come rinforzo strutturale dei conci o preferire il calcestruzzo fibro rinforzato (FRC).

3.2.3 *Resource allocation (Materials, Energy, Water)*

In tema di allocazione di risorse l'utilizzo dei conci interviene principalmente sulla sostenibilità dei materiali, sull'approvvigionamento e bilancio dei materiali, ossia sulla minimizzazione dei movimenti terra e altri materiali di scavo al di fuori del sito. Si possono prevedere:

- il riutilizzo di materiali di scavo nella produzione dei conci, riducendo sensibilmente le quote destinate a discarica e i relativi viaggi per lo smaltimento;
- l'utilizzo delle certificazioni di qualità dei materiali che possono essere riferite ai diversi requisiti di sostenibilità: ad es. contenuto di riciclato, impatto sul cambiamento climatico e sull'uso delle acque (AIS 4/2022);
- l'uso di materiali riciclati anche nel caso dei distanziatori per impilare i conci nei piazzali di stoccaggio. Distanziatori in plastica riciclata consentono di sostituire quelli in legno e assicurare migliori prestazioni riguardanti la facilità di spostamento, la resistenza alle condizioni esterne, la riduzione di rischio infortuni per i lavoratori;

Sempre in tema di allocazione di risorse (energia), l'utilizzo dei conci può rispondere a domande di riduzione dei consumi in fase di costruzione ed esercizio. Possibili soluzioni sono:

- migliorare le prestazioni del calcestruzzo nelle prime ore di maturazione per accelerare la fase di scasso riducendo i tempi della maturazione a vapore con riduzione dei consumi di energia;
- la scelta strategica di produrre in house i conci con una riduzione dei costi dei trasporti e delle emissioni di gas serra (Pupa 2023);
- introdurre innovazioni di processo che riguardano produzione e posa in opera per migliorare l'efficienza delle operazioni grazie a un adeguato coordinamento delle squadre di operai e dell'attività (AIS 4/2022);

- considerare la possibilità di attivazione termica dei rivestimenti dei tunnel ("tunnel energetici"), che potrebbe consentire di sfruttare l'energia immagazzinata nel terreno con notevoli vantaggi economici e benefici ambientali (Nicholson 2015, Barla & Di Donna 2018).

Per quanto riguarda le acque, come dimostrato dal progetto Infravation SEACON (Sustainable Concrete Using Seawater, Salt-Contamination Aggregates, and Non-Corrosive Reinforcement), l'uso di barre d'armatura in vetroresina (GFRP) consente l'utilizzo sicuro di acqua di mare e aggregati contaminati da sale (naturali o riciclati) per una produzione sostenibile di calcestruzzo (SIG-WG2).

3.2.4 *Natural world (Siting, Conservation, Ecology)*

Al momento non sono state individuate soluzioni di sostenibilità direttamente correlabili all'uso del segmental lining per questa categoria.

3.2.5 *Climate and resilience (Emissions, Resilience)*

In tema di Clima e resilienza (emissions), l'utilizzo dei conci risponde alla domanda di riduzione delle emissioni di carbonio e dunque di riduzione degli impatti legati all'estrazione, lavorazione/produzione e trasporto dei materiali durante tutta la vita utile del progetto. È opportuno tener presente che il calcolo delle emissioni di CO₂ e altri gas serra è piuttosto articolato e che la scelta della soluzione più sostenibile dovrebbe essere guidata da LCA, come già evidenziato.

A livello generale, le emissioni possono essere ridotte incorporando criteri di sostenibilità nel dimensionamento dei conci sia in termini geometrici, evitando sovradimensionamenti, sia in termini di mix design. Faver et al. (2018) propongono una disamina delle possibili strategie di ottimizzazione considerando tutte le fasi della catena del valore, a partire dalla riduzione dei combustibili fossili per la produzione di clinker combinata con l'adozione di cementi a basso contenuto di clinker, passando per la riduzione del cemento nel calcestruzzo e infine arrivare alla diminuzione del calcestruzzo nella struttura. Secondo gli autori questo processo potrebbe portare entro il 2050 a una riduzione fino all'80% delle emissioni di CO₂ rispetto ai valori del 1990 senza utilizzare tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio, a fronte di alcuni investimenti da parte dei produttori di cemento per migliorare le tecnologie dei forni, e una certa diffusione dei combustibili alternativi e della pratica di sostituire il clinker.

Riguardo al processo produttivo, l'industria sta facendo molti passi per raggiungere la decarbonizzazione della filiera del cemento; per esempio, utilizzando scarti di produzione provenienti da altri settori manifatturieri per sostituire il clinker, realizzando impianti di cattura della CO₂ emessa in fase di produzione del cemento, utilizzando fonti di energia non

fossili per la fase di cottura nel forno e introducendo tecniche di riciclo dell'acqua nel ciclo di produzione. (Failla & Ronchetti, 2023).

In merito all'ottimizzazione del mix design, tra le soluzioni che promuovono la decarbonizzazione si possono individuare:

- l'uso di fibre d'acciaio o sintetiche per i conci prefabbricati, che può ridurre drasticamente la CO₂ incorporata. Per avere una stima dell'effettiva riduzione è necessario considerare i diversi mix design che rispondono ai requisiti del progetto e le modalità di produzione delle fibre: il tipo di forno, ossigeno basico o arco elettrico, ha un ruolo significativo così come le fonti di alimentazione utilizzate (carbone, gas, petrolio e centrali nucleari) (ITATECH report n°7). L'uso di FRC presenta altri numerosi vantaggi, tra i quali la maggiore duttilità, resistenza, durabilità e la più facile fabbricazione e processo costruttivo. Un'analisi comparativa tra diversi calcestruzzi e configurazioni di rinforzo per la produzione dei conci consente di tenere conto dei requisiti economici, ambientali e sociali coinvolti nella produzione dei conci prefabbricati, valutando sia le prestazioni meccaniche che quelle ambientali rispetto a valori di riferimento prestabiliti (Plizzari 2023; Pupa 2023, Meda 2017). La completa sostituzione delle barre di acciaio con fibre strutturali, applicabile ai casi in cui il rischio di cracking è basso sia in fase transitoria sia in fase di servizio, non è possibile quando sono previsti carichi elevati (de la Fuente 2017);
- l'utilizzo di cementi a base di calcio solfoalluminato (CSA) comporta minori temperature di clinkerizzazione e relative minori emissioni di CO₂ rispetto al clinker Portland. Grazie alla presa rapida, veloce sviluppo delle resistenze, impiego alle basse temperature, basso ritiro e resistenza ai solfati, può essere impiegato nei processi di prefabbricazione dei conci evitando l'uso della maturazione a vapore e velocizzando sia la produzione sia le fasi di installazione del rivestimento;
- l'utilizzo di leganti alternativi come gli AA (alkali-activated) potrebbe portare a un potenziale risparmio della CO₂ stimabile fino a più del 40% di quella relativa al CEM I, ma presenta ancora molte limitazioni legate alle emissioni dell'attivatore, alla disponibilità dei precursori, ai problemi di sicurezza nella gestione di sostanze molto alcaline, al calore richiesto per sviluppare resistenze adeguate. Alcune di queste limitazioni vengono meno nel caso di elementi prefabbricati quindi per alcuni progetti gli AA potrebbero trovare applicazione nella realizzazione dei conci, a valle di analisi costi-benefici (Favier et al. 2018).

Per rispondere alla domanda di massimizzazione della resilienza occorre pensare a un calcestruzzo innovativo e sostenibile che sia cioè longevo, auto-riparante, galleggiante (AIS 4/2022).

Anche le tecnologie digitali e i sistemi di AI possono aiutare a rafforzare l'integrazione funzionale del progetto in sistemi di infrastrutture connessi, efficienti e diversificati, per esempio controllando in modo capillare le produzioni e individuando tempestivamente azioni correttive.

Infine, si può citare l'approccio decisionale MI-RET (Management and Identification of the Risk for Existing Tunnels), che, insieme ad Archita, introduce tecnologie e innovazioni per giungere ad un Asset Management più sostenibile delle gallerie, consentendo di tagliare emissioni fino al 45,5% rispetto alle attuali ispezioni ordinarie dei tunnel autostradali e fino al 40,8% rispetto a quelli delle gallerie ferroviarie, oltre a strumenti in grado di misurare la vulnerabilità ai cambiamenti climatici sull'infrastruttura (Foria et al. 2024).

4 CONCLUSIONI

In conclusion, on the basis of this preliminary phase of the activity of WG2, sustainability rating systems seem a valid, transversal and exhaustive reference that can be practically used to analyze the sustainability of specific project solutions as well as to identify critical elements or issues to be further explored.

The proposed solutions, related to the segmental lining, appear more influent on the categories Leadership, Resource allocation and Climate and resilience, while they don't seem to improve directly the Quality of Life and Natural World categories.

The next work phases of the WG will be aimed at developing keys to effectively use and interpret the protocols requirements and relevant solutions, facilitating the quantitative comparison between Envision and Breeam through a cross-check list that takes into account the scores associated with each credit.

The results of the survey and the bibliography will then be further updated, with the aim of producing more in-depth analyses (for example with respect to the life cycle of tunnels) and collecting more solutions applicable to segmental lining that would positively influence the sustainability of the whole project. Finally, the work will be illustrated in an extended report and presented also internationally for alignment and possible contribution to similar or complementary works of other ITA Groups. / In conclusione, sulla base di questa fase preliminare di lavoro del WG2 è possibile rilevare che i protocolli di sostenibilità possono essere un valido riferimento, trasversale e comprensivo, da poter utilizzare in forma funzionale rispetto all'analisi della sostenibilità di specifiche soluzioni progettuali nonché alla indicazione dei principali elementi di criticità o potenzialità da approfondire.

Si può verificare, ad esempio, che le soluzioni proposte relativamente all'uso di conci prefabbricati rispondono prevalentemente alle domande delle

categorie di Leadership, Resource Allocation e Climate and Resilience, mentre non sembrano influire direttamente sulle categorie Quality of life and Natural world.

Le successive fasi di lavoro del WG saranno volte allo sviluppo di chiavi di utilizzo e lettura efficaci delle domande e delle soluzioni proposte, facilitando il confronto in termini quantitativi tra Envision e Breeam per mezzo di una check list di incrocio che tenga conto dei punteggi associati a ciascun credito. I risultati del sondaggio e la bibliografia saranno poi ulteriormente aggiornati, allo scopo di produrre analisi più approfondite (per esempio rispetto al ciclo di vita delle gallerie) e raccogliere più soluzioni applicabili ai concetti che influiscano positivamente sulla sostenibilità di tutta l'opera. Infine, il lavoro verrà illustrato in un report esteso e presentato anche a livello internazionale per allineamento e possibile contribuzione a lavori simili o complementari di altri Gruppi ITA.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i membri del Gruppo di Lavoro 2 della Società Italiana Gallerie che lavorano attivamente sul tema presentato e che desideriamo citare: Federico Foria, Marianna Brichese, Enrico Barbero, Diego Sebastiani, Daniele Sirtori ed Elena Gujatti. Si ringrazia inoltre la Società Italiana Gallerie per aver reso possibile la condivisione del sondaggio tramite una pagina dedicata sul sito www.societaitalianagallerie.it e tutti i soci che hanno risposto a oggi al sondaggio.

REFERENCES

- AIS. 2022. Il contributo del calcestruzzo alla sostenibilità delle infrastrutture. Position paper AIS 4/2022.
- Bahriye Ilhan, Rongbo Hu, Kepa Iturralde, Wen Pan, Meysam Taghavi and Thomas Bock. 2019. Achieving sustainability in construction through automation and robotics. Conference Paper · March 2019.
- Barla M., Di Donna, A. 2018. Energy tunnels: concept and design aspects. *Underground Space 3 (2018) 268–276*.
- Construction Products Regulation (EU) N° 305/11.
- Darinde Gijzel, Marian Bosch-Rekvelde, Daan Schraven and Marcel Hertogh. 2019. Integrating Sustainability into Major Infrastructure Projects: Four Perspectives on Sustainable Tunnel Development. Sustainability novembre 2019.
- de la Fuente, A., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A. (2016). Sustainability assessment of precast concrete segments for TBM tunnels. *II International Conference on Concrete Sustainability ICCS16, 2016*.
- de la Fuente, A., Blanco, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017). Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona airport T1. *Tunnelling and Underground Space Technology, 61, 179–188*. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.008>.
- Failla, C., Ronchetti, A. 2023. La misura dell'impatto ambientale delle costruzioni. Position paper convegno CTE, settembre 2023.
- Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., Habert, G. 2018. A sustainable future for the European cement and concrete industry. ETH Zurich, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Foria F., Miceli G., Calicchio M., Brichese M. (2024). Decarbonization and climate change analysis of tunnels in an Asset Management framework through MIRET. *II Fabre Conference – Existing bridges, viaducts and tunnels: research, innovation and applications (FABRE24)*. In fase di pubblicazione.
- Huymajer, M., Woegerbauer, M., Winkler, L., Mazak-Huemer, A., Biedermann, H. 2022. An interdisciplinary systematic review on sustainability in tunneling — Bibliometrics, challenges, and solutions. *Sustainability 2022, 14, 2275*.
- ITACUS. 2011. Sustainable Urban Underground Development. White paper ITA committee on underground space - ITACUS.
- ITATECH. 2020. Environmental and sustainable development reasons for going underground. *ITAtch Report n°3/JANUARY 2020*.
- ITATECH. 2019. Guidelines on rebuilds of machinery for mechanized tunnel excavation. *ITAtch Report n°5-V2 MARCH 2019*.
- ITATECH. 2018. Guideline for good practice of fibre reinforced precast segment - Vol. 2: Production aspects. *ITAtch Report n°9/MARCH 2018*.
- ITATECH. 2016. Design guidance for precast fibre reinforced concrete segments. *ITAtch Report n°7, volume 1: design aspects*.
- Meda, A. 2017. Precast tunnel segment in fibre-reinforced concrete. *WPI.4.1, Bulletin 83 State of the art report, October 2017*
- Miseri, F. 2010. Spunti di riflessione sulla sostenibilità del ciclo di vita delle infrastrutture in calcestruzzo. *Federbeton, dicembre 2010*
- Nicholson, Chen, de Silva, Winter and Winterling. 2015. The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK. *Engineering Sustainability Volume 167 Issue ES3*.
- NORWEGIAN TUNNELLING SOCIETY. 2022. Sustainability in norwegian tunnelling. *Publication no. 30, 2022*.
- Parker, H. 2004. Underground Space: Good for Sustainable Development, and Vice Versa. *World Tunnel Congress, Singapore, May 2004*.
- PAS 2080: Carbon management in buildings and infrastructure guidance.
- Plizzari, G., Tiberti, G., Trabucchi, I. 2023. Rivestimenti in anelli di concetti prefabbricati di gallerie realizzate con TBM. Industrializzazione e sostenibilità. *Convegno CTE/SIG "Rivestimenti in anelli di concetti prefabbricati di gallerie realizzate con TBM. Industrializzazione e sostenibilità". Brescia, 16 novembre 2023*.
- Pupa, N. 2023. Case History significativi di prefabbricazione in proprio per una gestione industrializzata e sostenibile del processo di produzione dei concetti: Metro Tolosa e TELT C05. *Convegno CTE/SIG "Rivestimenti in anelli di concetti prefabbricati di gallerie realizzate con TBM. Industrializzazione e sostenibilità". Brescia, 16 novembre 2023*.
- SIG-WG2. Segmental lining - new technologies and products. Pubblicazione in corso.
- UNI EN 15804: Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto.
- United Nations. 2015. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development.
- Zargarian, Hunt, Braithwaite, Bobylev and Rogers. 2016. A new sustainability framework for urban underground space. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Engineering Sustainability, June 2016*.