



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO

TESI DI LAUREA

SVILUPPO DI UN SISTEMA DI SUPPORTO DECISIONALE PER LA SELEZIONE  
DELLE TECNOLOGIE TRENCHLESS PER IL RISANAMENTO DELLE CONDOTTE

Candidato: Filippo Marinoni

Relatore: Prof.ssa Sara Todeschini

Correlatori:

Ing. Stefano Roberto Carnevali

Ing. Federica Fuselli

A.A. 2024/2025



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>6</b>
1.1	Necessità di rinnovamento delle reti di acquedotto/fognatura	6
1.2	Tecnologie <i>no-dig</i> : inquadramento, applicazioni e vantaggi	9
1.2.1	Classificazione delle tecnologie <i>no-dig</i>	9
1.2.2	Campi di impiego delle tecnologie <i>no-dig</i>	10
1.2.3	Principali benefici del <i>no-dig</i>	10
1.3	Obiettivi e organizzazione della tesi	11
1.3.1	Scopo della tesi	11
1.3.2	Organizzazione della tesi	12
<b>2</b>	<b>Revisione della letteratura</b>	<b>13</b>
2.1	Sistemi di supporto alle decisioni (DSS)	13
2.1.1	Criticità dei DSS esistenti	19
2.1.2	Vantaggi introdotti dal DSS sviluppato	20
<b>3</b>	<b>Tecnologie di risanamento</b>	<b>22</b>
3.1	Riabilitazione delle condotte	22
3.2	Classificazione delle tecnologie di risanamento	24
3.2.1	Tecnologie di rinnovamento	25
3.2.2	Tecnologie di sostituzione	28
3.2.3	Tecnologie di riparazione	28
3.3	Processo decisionale di selezione della tecnologia di risanamento	29
<b>4</b>	<b>DSS sviluppato</b>	<b>30</b>
4.1	Introduzione	30
4.2	Database	31
4.2.1	Struttura del database	33
4.2.2	Parametri delle tecnologie	34
4.3	Algoritmo	41
4.3.1	Interfaccia utente	41
4.3.2	Processo di selezione	49
4.4	Report PDF	54
<b>5</b>	<b>Validazione del sistema</b>	<b>59</b>
5.1	Modalità del processo di validazione	59
5.2	Casi progettuali	60
5.2.1	Caso A - Impianto idroelettrico in Val Venosta	61
5.2.2	Caso B - Limena, Via Del Santo	63

5.2.3	Caso C - Rozzano, Viale Isonzo . . . . .	68
5.2.4	Caso D - Merano, Via dei Portici . . . . .	70
5.2.5	Caso E - Comune in provincia di Venezia . . . . .	75
5.3	Analisi dei risultati della validazione . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Considerazioni conclusive</b>	<b>79</b>
6.1	Sintesi del lavoro svolto . . . . .	79
6.1.1	Limiti del sistema sviluppato . . . . .	79
6.2	Possibili sviluppi futuri . . . . .	80
6.2.1	Classificazione delle tecnologie . . . . .	81
6.3	Conclusioni . . . . .	83
	<b>Bibliografia</b>	<b>84</b>
	<b>Allegati</b>	<b>88</b>
	<b>Allegato A</b> Impianto idroelettrico in Val Venosta: report	<b>88</b>
	<b>Allegato B</b> Limena, Via Del Santo: report	<b>91</b>
	<b>Allegato C</b> Merano, Via dei Portici: report	<b>96</b>

# Elenco delle figure

1.1	Valori medi di M1a e M1b per area geografica . . . . .	7
1.2	Numero di rotture per km di rete, confronto con M1a per area geografica . . . . .	7
1.3	Valori medi di M4a per area geografica . . . . .	8
1.4	Classificazione delle tecnologie <i>no-dig</i> . . . . .	10
2.1	TAG-R: diagramma di flusso per valutare le condotte idriche	15
2.2	<i>WaterRehab Select</i> : schema del sistema decisionale . . . . .	16
2.3	<i>WaterRehab Select</i> : gerarchia decisionale del DSS . . . . .	17
3.1	Classificazione strutturale dei <i>liner</i> in pressione . . . . .	23
3.2	Classificazione strutturale dei <i>liner</i> e corrispondenza con le tecnologie . . . . .	23
3.3	Classificazione delle tecnologie di risanamento <i>no-dig</i> . . . . .	25
4.1	Struttura del DSS sviluppato . . . . .	31
4.2	Definizione delle condizioni del vecchio tubo da I a IIIa . . . . .	36
4.3	Schermata di avvio del programma . . . . .	42
4.4	Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 1	43
4.5	Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 2	44
4.6	Elenco dei materiali disponibili nel programma . . . . .	45
4.7	Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 3	46
4.8	Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 4	47
4.9	Opzioni di severità delle curve disponibili nel programma . . . . .	48
4.10	Schermata dei risultati forniti dal programma . . . . .	49
4.11	Finestra di conferma della generazione del report PDF . . . . .	50
4.12	Report: info generali e riepilogo parametri prima tratta . . . . .	55
4.13	Report: elenco delle tecnologie compatibili . . . . .	55
4.14	Report per tratte con variazione dimensionale e scavo intermedio . . . . .	56
4.15	Report: note tecniche . . . . .	57
4.16	Report: sezione finale . . . . .	58
5.1	Caso A - Impianto idroelettrico in Val Venosta: planimetria di progetto . . . . .	61
5.2	Caso A - Impianto idroelettrico in Val Venosta: report generato dall'algoritmo . . . . .	63
5.3	Caso B - Limena: planimetria di progetto . . . . .	64
5.4	Caso B - Limena: curve localizzate nei pozzetti . . . . .	65

5.5	Caso B - Limena: report tratta 1 . . . . .	66
5.6	Caso B - Limena: report tratta 2 . . . . .	67
5.7	Caso B - Limena: sezione conclusiva del report . . . . .	68
5.8	Caso C - Rozzano: planimetria di progetto . . . . .	68
5.9	Caso C - Rozzano: report . . . . .	69
5.10	Caso D - Merano: planimetria di progetto . . . . .	70
5.11	Caso D - Merano: report tratta 2 . . . . .	71
5.12	Caso D - Merano: report tratta 3 . . . . .	72
5.13	Caso E - Provincia di Venezia: planimetria generale di progetto	75
5.14	Caso E - Provincia di Venezia: report . . . . .	76
6.1	Struttura prevista per il DSS con classificazione delle tecnologie	82

# Elenco delle tabelle

4.1	Elenco delle tecnologie di risanamento presenti nel database	32
5.1	Analisi dei risultati della validazione del sistema . . . . .	77
5.2	Distribuzione del surplus di tecnologie individuate dal sistema	78

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Necessità di rinnovamento delle reti di acquedotto/fognatura

In Italia, come in altri paesi del mondo, le reti di acquedotto e di fognatura costituiscono una componente fondamentale delle infrastrutture urbane. Tuttavia, la politica e l'informazione tendono a sottostimare l'importanza delle infrastrutture del sottosuolo rispetto alle infrastrutture soprasuolo [5]; ciò ha contribuito, nel corso degli anni, alla mancanza di un adeguato piano di manutenzione programmato dei sistemi idraulici urbani.

L'età media delle reti del Servizio Idrico Integrato (insieme dei servizi pubblici di captazione, adduzione e distribuzione di acqua ad usi civili di fognatura e di depurazione delle acque reflue, come definito dal Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 [22]) supera la vita utile considerata ai fini regolatori, pari a 40 anni; sulla base dei dati raccolti nel 2017 da AEEGSI (Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas e il Sistema Idrico) a livello nazionale, il 22% delle condotte di acquedotto ed il 25% delle condotte di fognatura hanno un'età superiore ai 50 anni [8]. Pertanto, a causa dello scarso tasso di rinnovo, tali infrastrutture registrano criticità riguardo la vetustà e lo stato di conservazione delle reti, con conseguenti perdite idriche ingenti [11].

La Relazione Annuale sullo Stato dei servizi relativa all'anno 2024, pubblicata da ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, ex AEEGSI), riporta un'accurata analisi delle condizioni delle reti idriche in Italia nell'anno considerato. Per quanto riguarda il servizio di acquedotto, le perdite idriche vengono misurate dal macro-indicatore "M1 - Perdite idriche", composto dai seguenti indicatori semplici:

- M1a – Perdite idriche lineari: rapporto tra volume medio giornaliero delle perdite idriche totali e lunghezza complessiva della rete di acquedotto;
- M1b – Perdite idriche percentuali: rapporto tra volume delle perdite idriche totali e volume complessivo in ingresso nel sistema di acquedotto.

A livello nazionale, nel 2024 le perdite idriche lineari sono risultate mediamente pari a  $18.0 \text{ m}^3/(\text{km} * \text{gg})$  e le perdite percentuali mediamente pari al 42.0%. La Figura 1.1 rappresenta i valori degli indicatori M1a e M1b per area geografica; è evidente che le perdite idriche più elevate sono localizzate nell'area Sud e Isole.

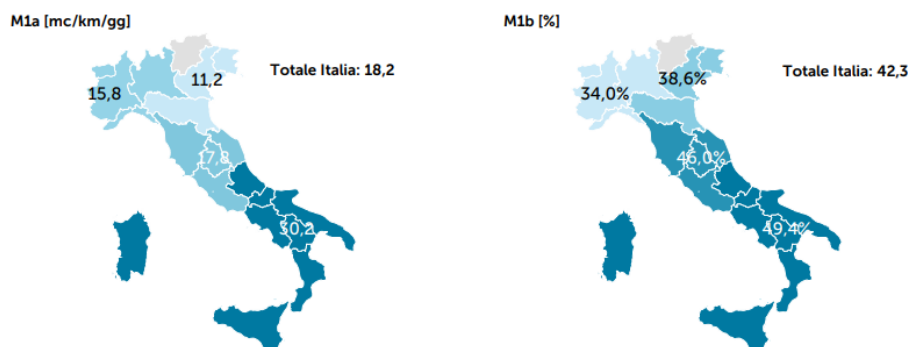


Figura 1.1: Valori medi di M1a (Perdite idriche lineari) e M1b (Perdite idriche percentuali) per area geografica [21]

Un ulteriore indicatore dello stato di degrado del sistema idrico è il numero di rotture per km di rete, il cui valore medio a livello nazionale è pari a  $0.70/\text{km}$  di rete; la Figura 1.2 evidenzia la correlazione tra questo parametro e l'indicatore M1a.

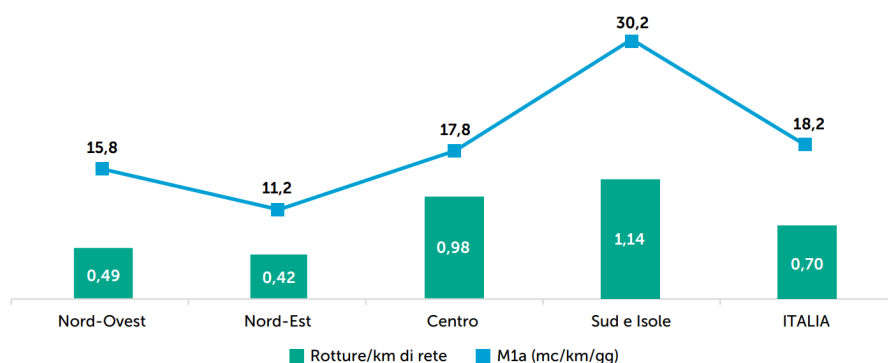


Figura 1.2: Numero di rotture per km di rete, confronto con M1a (Perdite idriche lineari) per area geografica [21]

Le performances tecniche del servizio di fognatura vengono misurate dal macro-indicatore "M4 - Adeguatezza del sistema fognario", ottenuto dalla combinazione dei seguenti indicatori semplici:

- M4a – Frequenza allagamenti e/o sversamenti da fognatura: rapporto tra numero di episodi di allagamento da fognatura mista o bianca e di sversamento di liquami da fognatura nera e lunghezza di rete fognaria gestita;
- M4b – Adeguatezza normativa degli scaricatori di piena: rapporto tra numero di scaricatori di piena non conformi alle normative e numero complessivo di scaricatori gestito;

- M4c – Controllo degli scaricatori di piena: rapporto tra numero di scaricatori di piena che non sono stati oggetto di ispezione nel corso dell’anno ovvero che non siano dotati di sistemi di rilevamento automatico dell’attivazione, e numero totale di scaricatori gestito.

Solo l’indicatore M4a è significativo ai fini della valutazione dello stato delle condotte fognarie: la Figura 1.3 ne indica l’andamento per area geografica, in linea con gli altri indicatori. A livello nazionale il valore medio è di 5.3  $n/100$  km, con  $n$  = numero di allagamenti e/o sversamenti [21].

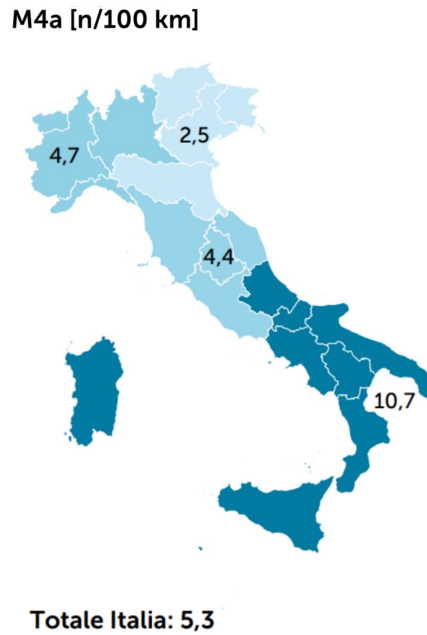


Figura 1.3: Valori medi di M4a (Frequenza allagamenti e/o sversamenti da fognatura) per area geografica [21]

I valori degli indicatori presentati evidenziano il cattivo stato delle infrastrutture idrauliche urbane esistenti in Italia, le quali necessitano di maggiori investimenti finalizzati a realizzare interventi per il rinnovamento delle reti; inoltre, negli ultimi anni, l’espansione urbanistica ha generato sovraccarichi alle reti precedentemente costruite, causando la necessità di effettuare ulteriori interventi di adeguamento e potenziamento del sistema idrico. Tutto ciò richiede, inevitabilmente, l’apertura di numerosi cantieri [11]. Inoltre, la maggior parte delle reti acquedottistiche e fognarie si sviluppa nel sottosuolo di aree urbane, spesso ad alta densità di popolazione [10], dove la circolazione veicolare rappresenta una criticità crescente. In questo particolare contesto effettuare interventi su condotte interrato con metodologia tradizionale, la quale richiede l’apertura di scavi a cielo aperto, genera sempre effetti negativi sull’ambiente urbano. Per questo, l’approccio strategico deve mirare al rinnovamento delle reti idriche cercando di ridurre al minimo l’apertura di scavi superficiali, limitando così i disagi per la comunità [5]. L’utilizzo delle tecnologie *no-dig* permette ai gestori delle reti di orientarsi in questa direzione.

## 1.2 Tecnologie *no-dig*: inquadramento, applicazioni e vantaggi

Le tecnologie *no-dig* (tecnologie senza scavo), o tecnologie *trenchless* (tecnologie senza trincea), sono tecnologie e metodi costruttivi che permettono di effettuare operazioni di interrimento, risanamento e sostituzione di tubazioni e cavi sotterranei, con un limitato o nullo ricorso agli scavi a cielo aperto. L'espressione *no-dig* è un neologismo nato da "*no-digging*", letteralmente "no-scavo" [5]. Tuttavia, i termini *trenchless* e *no-dig* sono utilizzati impropriamente, poiché in realtà molte tecnologie *trenchless*, specialmente quelle per nuove installazioni, richiedono uno scavo in superficie; sarebbe più appropriato definire queste tecnologie come metodi che fanno il minimo ricorso agli scavi superficiali [16]. Le tecnologie *trenchless* sono attualmente collocabili nella categoria SOA OS35 (Interventi a Basso Impatto Ambientale) [11], la quale "riguarda la costruzione e la manutenzione di qualsiasi opera interrata mediante l'utilizzo di tecnologie di scavo non invasive [...] con l'eventuale riutilizzo e sfruttamento delle opere esistenti." [3].

### 1.2.1 Classificazione delle tecnologie *no-dig*

L'associazione IATT (*Italian Association for Trenchless Technology*) è un'associazione nazionale senza fini di lucro fondata nel 1994 con il fine di promuovere le conoscenze tecnico-scientifiche nell'ambito delle tecnologie *trenchless* per la posa e il risanamento delle reti dei sottoservizi, favorendone la diffusione presso le Pubbliche Amministrazioni, le Aziende di gestione delle reti di servizi, le Imprese e i professionisti del settore. IATT classifica le tecnologie *no-dig* in tre famiglie principali a seconda della tipologia di intervento a cui sono destinate:

- indagini conoscitive: il termine comprende tutte le tecnologie atte a localizzare e mappare le infrastrutture presenti nel sottosuolo in maniera non distruttiva [19], nonché ad ispezionare le superfici interne di tubazioni esistenti;
- nuove installazioni: il termine nuove installazioni, o nuova posa, comprende tutte le tecnologie atte a posare una nuova tubazione o servizio sotterraneo per sostituire o rinnovare un sistema esistente o per installare un nuovo servizio [30];
- risanamento: il termine anglosassone *Rehabilitation*, in italiano risanamento o riabilitazione, comprende tutte le tecnologie atte a ripristinare, mantenere ed eventualmente incrementare le performances di un sistema di tubazioni esistenti.

La Figura 1.4 illustra lo schema di classificazione, il quale riporta le tecnologie utilizzate in Italia [34].

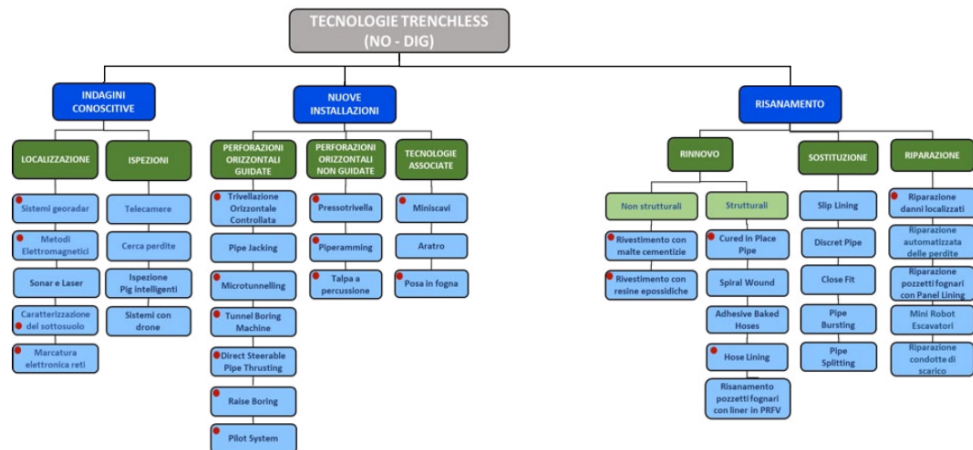


Figura 1.4: Classificazione delle tecnologie *no-dig* [34]

Il presente lavoro di tesi si colloca nell’ambito del risanamento (*Rehabilitation*). Il Capitolo 3 approfondisce il campo riguardante le tecnologie di riabilitazione e ne riporta una ulteriore classificazione [33].

### 1.2.2 Campi di impiego delle tecnologie *no-dig*

I campi di impiego delle tecnologie *no-dig* sono svariati e in continua evoluzione. I campi tradizionali sono i seguenti:

- interrimento, riabilitazione e sostituzione di:
  - tubazioni per il trasporto di acqua (potabile e non);
  - condotte fognarie;
  - oleodotti e gasdotti;
  - tubazioni per la distribuzione del gas;
- interrimento e sostituzione di cavidotti per impianti di telecomunicazione o per bassa, media ed alta tensione elettrica;
- mappatura di sottoservizi e oggetti interrati preesistenti;
- diagnostica di condotte interrate [5].

Alcune tecnologie *trenchless* possono essere applicate per il consolidamento di versanti franosi e per la bonifica di siti contaminati, contribuendo così alla salvaguardia del patrimonio ambientale [34].

### 1.2.3 Principali benefici del *no-dig*

L’utilizzo di tecnologie che fanno il minimo ricorso agli scavi superficiali per la riabilitazione di condotte interrate permette di ridurre notevolmente gli impatti negativi sulla comunità, specialmente in contesti urbanizzati.

Rispetto ai tradizionali interventi svolti con metodi di scavo a cielo aperto, gli interventi svolti con tecnologie *trenchless* riducono:

- l'occupazione del suolo pubblico, in termini di tempo e spazio;
- l'apertura del manto stradale (e quindi i danni alla pavimentazione);
- l'impatto sulla viabilità;
- le interferenze con attività commerciali, aree residenziali e lavorative;
- le interferenze con sottoservizi esistenti o tubazioni abbandonate;
- gli infortuni nei cantieri;
- la movimentazione di materiale;
- il traffico di mezzi pesanti.

Questi evidenti benefici socio-ambientali comportano una significativa riduzione dei costi indiretti rispetto agli interventi convenzionali [11, 16]. In passato le applicazioni *no-dig* erano più costose rispetto a quelle tradizionali con scavo a cielo aperto; oggi non è più così. Infatti, grazie all'aumento dell'efficienza e della produttività, dovuti al progresso delle tecnologie negli anni, e all'aumento dell'offerta, provocato dall'incremento del numero di imprese specializzate, i costi diretti di intervento sono notevolmente ridotti. In futuro, con lo sviluppo dell'intera industria collegata al *no-dig*, gli interventi *trenchless* risulteranno sempre più convenienti dal punto di vista economico [5].

## 1.3 Obiettivi e organizzazione della tesi

### 1.3.1 Scopo della tesi

La fase più importante nella progettazione di un intervento di risanamento *trenchless* è la selezione della tecnologia più appropriata, affidabile ed economica. La scelta dev'essere basata sull'analisi delle condizioni dello specifico progetto [16]. Tale scelta rappresenta un processo complicato per i gestori del Servizio Idrico Integrato (SII), poiché coinvolge un elevato numero di parametri e richiede una conoscenza approfondita delle caratteristiche delle diverse tecnologie *trenchless*. Attualmente, il processo di selezione della tecnologia viene effettuato senza l'impiego di strumenti di supporto decisionale; questo processo può avere diverse limitazioni:

- ampia varietà delle tecnologie: identificare le limitazioni e applicazioni specifiche di ogni tecnologia è un'ardua sfida, poiché le tecnologie di risanamento *no-dig* esistenti sono numerose ed ognuna di esse ha caratteristiche e campi di applicabilità differenti ed in continuo avanzamento;

- capacità umana: la corretta selezione dipende dall'effettiva esperienza e conoscenza del settore da parte del decisore;
- evoluzione di tecnologie e prodotti: le soluzioni di recente sviluppo potrebbero non essere incluse nel processo di valutazione, a causa della scarsa fiducia dovuta alla limitata disponibilità di dati storici.

Di conseguenza, alcune tecnologie potrebbero essere trascurate durante il processo decisionale. L'utilizzo di un sistema di selezione automatico consentirebbe di migliorare la qualità del processo decisionale, riducendone la componente soggettiva e facendo risparmiare tempo ai responsabili di queste decisioni [1, 9].

Pertanto, l'obiettivo principale della presente tesi è sviluppare un sistema di supporto decisionale per la selezione delle tecnologie *trenchless* per il risanamento delle condotte. Per perseguire questo scopo sono state analizzate le caratteristiche di numerose tecnologie di risanamento *trenchless* presenti sul mercato e il processo decisionale coinvolto nella loro selezione. Le informazioni necessarie derivano da un'accurata analisi della letteratura.

### 1.3.2 Organizzazione della tesi

Il Capitolo 2 presenta una revisione della letteratura riguardante i sistemi di supporto decisionale (DSS, *Decision Support Systems*) per il risanamento delle reti idriche mediante l'utilizzo di tecnologie *trenchless*.

Nel Capitolo 3 vengono illustrate le differenti tecnologie di risanamento *no-dig* presenti nel database dell'algoritmo sviluppato.

L'elenco e la descrizione dei parametri decisionali, la struttura dell'algoritmo sviluppato e l'implementazione dello stesso sono descritti nel Capitolo 4.

Il Capitolo 5 descrive il processo di validazione del DSS sviluppato, effettuato mediante un ampio numero di progetti di risanamento.

Infine, nel Capitolo 6, vengono sintetizzate le attività e i risultati del lavoro svolto; inoltre, vengono presentate le limitazioni del sistema proposto e i suoi possibili sviluppi futuri.

# Capitolo 2

## Revisione della letteratura

### 2.1 Sistemi di supporto alle decisioni (DSS)

I DSS sono dei *software* che permettono di aumentare efficacia ed efficienza di un processo decisionale, fornendo al decisore funzionalità di analisi dei dati in modo rapido, semplice e interattivo; consentono di prendere decisioni consapevoli e *data-driven* (basate sui dati). È fondamentale sottolineare che i DSS non hanno lo scopo di sostituire il decisore, bensì quello di fornirgli supporto durante il processo decisionale.[4]

Negli anni sono stati sviluppati vari strumenti automatizzati per la selezione delle tecnologie di risanamento *no-dig*; questi sistemi utilizzano diversi modelli, tra cui:

- modelli deterministici (*rule-based*);
- processo di gerarchia analitica (AHP, *Analytical Hierarchy Process*);
- teoria dell'utilità (MAUT, *Multi-Attribute Utility Theory*);
- logica *fuzzy* [2].

Il lavoro di ricerca [12], pubblicato nel 2012, analizza i sistemi di supporto decisionali per la selezione delle tecnologie di risanamento *trenchless* esistenti, classificandoli in base al campo di applicabilità ed analizzandoli in base alle loro capacità. Dal punto di vista del campo di applicazione, i modelli sono suddivisi in tre gruppi:

1. raccolta delle acque reflue;
2. distribuzione dell'acqua;
3. generale (in grado di valutare entrambe le casistiche).

Vengono identificate le cinque capacità essenziali di un modello accurato:

1. elaborare dati sulle condizioni della tubazione da risanare;
2. considerare più tecnologie;

3. eseguire una valutazione tecnica delle specifiche condizioni di progetto;
4. eseguire una analisi dei costi;
5. eseguire una classificazione delle tecnologie.

Inoltre, viene sottolineata l'importanza dell'utilizzo di dati riguardanti le tecnologie che siano provenienti dall'area geografica di interesse.

Di seguito vengono approfonditi alcuni modelli ritenuti significativi (uno generale, uno per fognatura ed uno per acquedotto) in base alle loro capacità e struttura.

**TAG-R: *Trenchless Assessment Guide for Rehabilitation*** TAG-R è un *software* per la selezione delle tecnologie di riabilitazione, sviluppato da John C. Matthews nel 2008 per *National Association of Sewer Service Companies* (NASSCO). Il modello esegue una valutazione tecnica dei parametri specifici del progetto (quali diametro, lunghezza, forma, curve...) e, confrontandoli con le informazioni del progetto inserite dell'utente, fornisce come *output* l'elenco delle tecnologie tecnicamente valide. TAG-R è un modello:

- "generale": è infatti applicabile per fognature con funzionamento a pelo libero, condotte idriche in pressione, canali laterali e pozzetti;
- deterministico (*rule-based*).

I modelli *rule-based* utilizzano regole predefinite per guidare il processo decisionale in modo strutturato [27]. TAG-R valuta le tecnologie basandosi su diagrammi di flusso: per ogni campo di applicazione è stato sviluppato un diagramma di flusso dedicato. A titolo esemplificativo, nella Figura 2.1 è riportato il diagramma di flusso utilizzato per valutare le condotte idriche. I principali punti di forza di TAG-R sono:

- contiene il database di tecnologie più robusto;
- il processo di valutazione tecnica è verificato dall'industria.

Presenta, invece, le seguenti criticità:

- il modello non tiene in considerazione i difetti specifici della condotta da risanare;
- i dati dei costi relativi alle tecnologie non sono stati completamente implementati e validati.

Ai tempi della pubblicazione, attraverso il sito web del TTC (*Trenchless Technology Center*) fu reso disponibile il *software* TAG Online, una combinazione di TAG-R con TAG (*Trenchless Assessment Guide*), un DSS per la selezione di tecnologie *no-dig* per nuove installazioni sviluppato dallo stesso autore; al giorno d'oggi TAG Online (e quindi TAG-R) non è più reperibile.

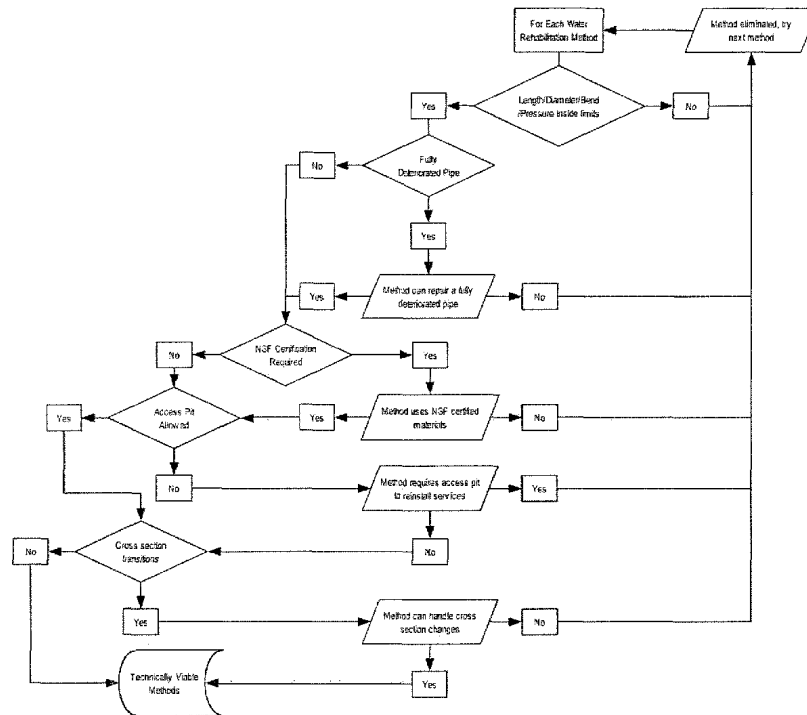


Figura 2.1: TAG-R: diagramma di flusso per valutare le condotte idriche [13]

L'autore identificò come raccomandazione futura lo sviluppo di un software che integri TAG-R con il calcolatore dei costi sociali (SCC, *social cost calculator*, implementato dallo stesso Matthews), un database dei costi diretti ( $\$/lunghezza$  in funzione del diametro) e un algoritmo per l'esecuzione dell'ottimizzazione multi-segmento (per selezionare la combinazione di tecnologie più conveniente in progetti in cui più segmenti sono coinvolti).

**WaterRehab Select** *WaterRehab Select* è un sistema automatizzato presentato da Ahmed Al-Aghbar nel 2005. Il sistema sviluppato rende automatica la selezione della tecnologia *trenchless* più adeguata per il risanamento di una determinata condotta idrica, considerando le caratteristiche di progetto e le preferenze del decisore. *WaterRehab Select* è composto da tre moduli:

1. diagrammi di flusso interattivi;
2. DFQS (*Data Files and Query System*);
3. DSS (*Decision Support System*).

Il diagramma di flusso seleziona le tecnologie, o la tecnologia, che possono riabilitare la condotta idrica in base ai difetti di cui soffre la condotta. Successivamente, l'utente inserisce le caratteristiche del progetto ed il DFQS seleziona le tecnologie tecnicamente applicabili. Se viene selezionata più di una tecnologia, il DSS viene attivato per classificare le tecnologie in ordine decrescente di adeguatezza, in base alle preferenze dell'utente, ai requisiti

tecniche, contrattuali ed economici. La Figura 2.2 riporta lo schema del sistema sviluppato da Al-Aghbar.

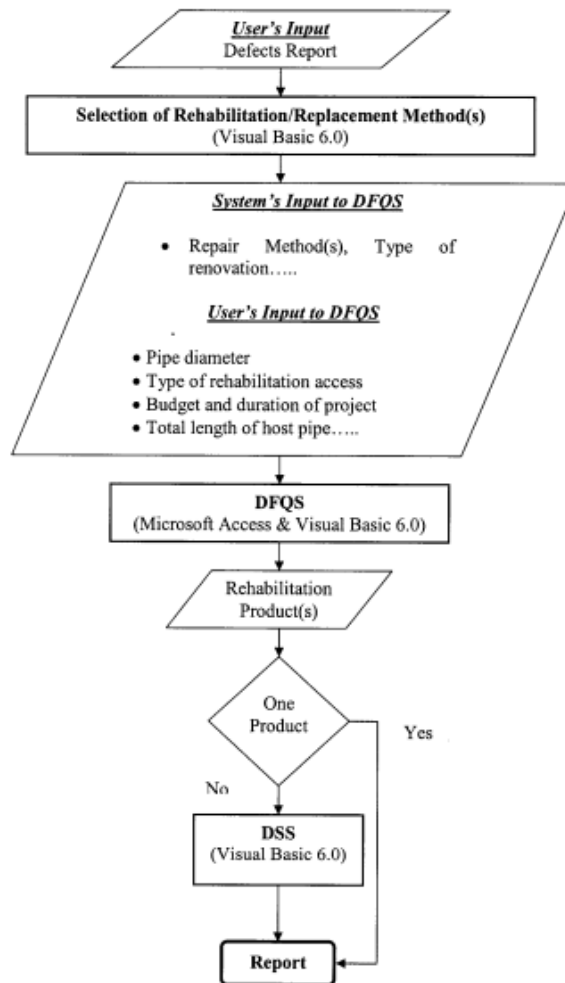


Figura 2.2: *WaterRehab Select*: schema del sistema decisionale [1]

I parametri utilizzati dal modello sono classificati in tre gruppi principali:

1. tecnici (es. diametro e tipologia della tubazione): determinano la fattibilità per lo specifico progetto, indipendentemente da requisiti dell'utente e contrattuali;
2. contrattuali (es. durata dell'intervento): garantiscono la conformità con le condizioni del contratto del progetto in esame;
3. economici (costi diretti e indiretti, costo del ciclo di vita): garantiscono che il costo totale rientri nei limiti di progetto.

Il sistema inizialmente seleziona l'elenco delle tecnologie applicabili in maniera deterministica (*rule-based*); successivamente, il DSS utilizza i modelli MAUT (teoria dell'utilità) e AHP (processo di gerarchia analitica) per classificare le tecnologie.

La MAUT assegna un valore di utilità per ciascun parametro (o attributo); assegnando un peso relativo ad ogni attributo, il valore di utilità totale per ogni tecnologia viene calcolato usando la seguente espressione:

$$U_i = \sum_{j=1}^n W_j U_{ij} \quad (2.1)$$

con  $W_j$  peso relativo assegnato all'attributo  $j$ -esimo;  $U_{ij}$  valore di utilità dell'attributo  $j$ -esimo associato alla tecnologia  $i$ -esima;  $U_i$  valore di utilità complessivo per ogni specifica tecnologia di risanamento  $i$ -esima. I due fattori chiave per determinare l'utilità complessiva di ciascuna alternativa sono il valore di utilità di ciascun attributo e il peso relativo associato a ogni parametro. Quest'ultimo rappresenta l'importanza relativa dello specifico attributo rispetto agli altri attributi considerati; il calcolo dei pesi relativi viene effettuato tramite AHP.

Il processo di gerarchia analitica (AHP) permette di incorporare nel sistema le preferenze dell'utente; effettua il calcolo dei pesi relativi in base ai confronti a coppie tra tutti gli attributi dello stesso livello gerarchico. I confronti (tra un attributo  $i$  e uno  $j$ ) vengono effettuati su una scala a 9 punti, dove 1 indica che gli attributi  $i$  e  $j$  hanno la stessa importanza, mentre 9 indica che il parametro  $i$  è assolutamente più importante del  $j$ -esimo. La gerarchia del DSS sviluppato è formata da tre livelli, come mostra la Figura 2.3.

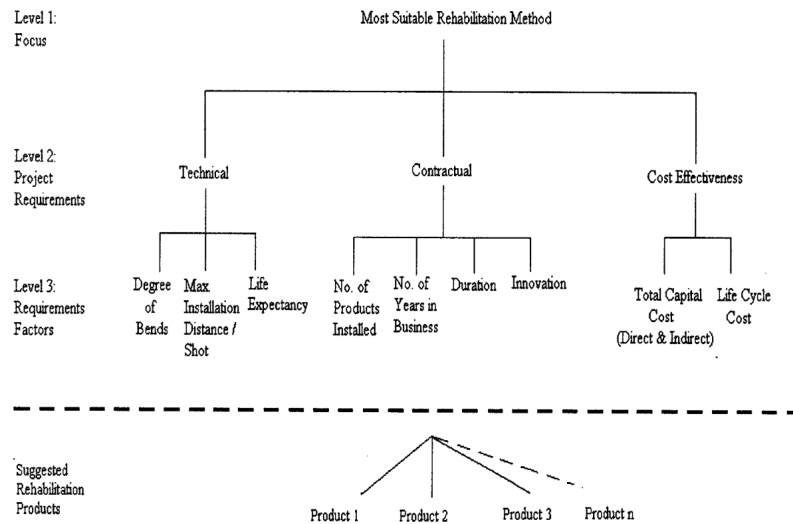


Figura 2.3: *WaterRehab Select*: gerarchia decisionale del DSS [1]

Per ogni progetto, l'utente decide quali dei nove possibili attributi (fattori elencati nella Figura 2.3) considerare; assegna a ciascuno di essi un valore massimo, uno minimo e una funzione di utilità; successivamente, tramite i confronti a coppie, vengono stabiliti i pesi relativi. Il sistema, dopo aver verificato che il rapporto di coerenza CR (riferito ai pesi relativi) sia minore o uguale al 10%, fornisce come *output* la classifica delle tecnologie più adatte per il progetto in esame.

L'utilizzo della metodologia ibrida MAUT e AHP ha i seguenti vantaggi:

- esprime il grado di importanza di ogni attributo in base alle preferenze dell'utente;
- stabilisce i pesi relativi in maniera ordinata;
- consente all'utente di verificare e, se necessario, rifare la classifica dell'importanza relativa degli attributi.

Le limitazioni del sistema individuate dall'autore sono:

- il sistema può essere avviato solo se si ha a disposizione un rapporto sui difetti della condotta;
- il DSS presuppone che gli attributi siano reciprocamente indipendenti tra loro;
- le informazioni contenute nel database non sono verificate dagli utenti finali e devono essere aggiornate periodicamente [1].

Inoltre:

- il campo di applicabilità è ristretto alle sole condotte di distribuzione idrica;
- il database comprende solamente otto tecnologie di risanamento.

Un modello strutturato in modo molto simile a *WaterRehab Select* è stato sviluppato da Shebab nel 2010: questo sistema è però applicabile solamente per condotte di fognatura in calcestruzzo o in gres [28].

**Modello *GIS-based*** Il prototipo del sistema *GIS-based*, sviluppato da Mahmoud R. Halfawy nel 2008, valuta l'applicabilità, i costi ed i benefici delle tecnologie di rinnovo delle condotte fognarie con funzionamento a pelo libero. L'applicabilità viene valutata in base a criteri che riguardano le caratteristiche della condotta fognaria, le condizioni del sito e ulteriori criteri operativi e socio-ambientali. Successivamente, le tecnologie applicabili vengono classificate in base al rapporto costi-benefici stimato.

L'autore ha proposto anche un algoritmo per ottimizzare la pianificazione del rinnovamento delle reti fognarie, con gli scopi di ottimizzare l'allocazione del budget per il rinnovo, massimizzare la condizione della rete e minimizzare il rischio di guasti; questo algoritmo classifica le condotte fognarie in base all'urgenza degli interventi necessari. Per ogni condotta con priorità di rinnovo viene utilizzato l'approccio di selezione delle tecnologie applicabili e vantaggiose. La presente analisi si concentra sulla procedura di selezione delle tecnologie di rinnovo appropriate. Questo sistema raggruppa le tecnologie nelle seguenti quattro categorie:

1. sostituzione: con scavo a cielo aperto o *no-dig* (in linea o fuori linea);

2. risanamento strutturale;
3. risanamento semi-strutturale;
4. risanamento non strutturale.

In base al grado di condizione della condotta, da 1 (eccellente) a 5 (collassata), e alla possibilità di perdere il sostegno del suolo, viene determinata la categoria di tecnologie da utilizzare. Successivamente, viene valutata l'applicabilità delle tecnologie presenti nella categoria selezionata con lo scopo di eliminare le tecnologie non applicabili per le specifiche condizioni di progetto. I costi totali unitari (costo per unità di diametro e unità di lunghezza) per ciascuna tecnologia sono stati stimati sulla base della letteratura e includono sia i costi diretti che quelli indiretti. I benefici vengono stimati in termini di miglioramento (o recupero) delle condizioni della condotta, assegnando valori predefiniti associati alle diverse categorie di tecnologie (es. 0.5 per il risanamento non strutturale e 2.0 per quello strutturale).

Le limitazioni del sistema individuate dall'autore stesso sono:

- la valutazione dei benefici non è robusta; una stima accurata dovrebbe considerare l'impatto post-risanamento sulle condizioni della condotta, per ciascuna tecnologia;
- problemi riguardo la stima dei costi: per alcune tecnologie non sono stati reperiti dati sui costi; i costi socio-ambientali andrebbero stimati separatamente;
- necessità di ulteriore lavoro da compiere per perfezionare ed estendere l'approccio e per sviluppare completamente il *software*.

Lo studio [12] riporta i seguenti vantaggi del modello *GIS-based*:

- l'approccio include i codici dei difetti della condotta;
- il sistema è l'unico strumento decisionale per acque reflue che comprende tutte le cinque capacità elencate nella Sezione 2.1.

Tuttavia, emerge una lacuna nel processo di selezione della tecnologia, il quale tiene in considerazione solamente le condizioni strutturali della condotta, trascurando la valutazione della capacità idraulica.

### 2.1.1 Criticità dei DSS esistenti

Dall'analisi letteraria di articoli che descrivono lo sviluppo di determinati DSS per la selezione di tecnologie di risanamento *trenchless* e di articoli che affrontano una *review* dei DSS per tale ambito, sono emerse le seguenti criticità riguardo ai vari sistemi esistenti:

- applicabilità limitata:
  - solo alla rete fognaria o a quella acquedottistica;

- solo per risanare tubazioni con determinati materiali;
- database inadeguato:
  - poche tecnologie di risanamento;
  - dati vecchi, ormai obsoleti;
  - dati provenienti da contesti geografici differenti;
- utilizzo di un numero limitato di parametri decisionali;
- omissione delle informazioni sui difetti della condotta esistente;
- mancanza di una validazione del sistema;
- stima dei costi diretti e indiretti spesso omessa o non accurata.

Inoltre, la maggior parte dei modelli è stata sviluppata negli Stati Uniti, il che renderebbe difficile l'adattamento al contesto italiano; oltretutto, nessuno dei *software* menzionati in letteratura risulta attualmente disponibile online o in commercio.

### 2.1.2 Vantaggi introdotti dal DSS sviluppato

Il nuovo DSS sviluppato, descritto nella presente tesi, intende risolvere le criticità elencate nel Paragrafo 2.1.1. Pertanto, il modello proposto presenta i seguenti vantaggi:

- applicabilità generale, non limitata in base alla tipologia di rete o al materiale della condotta esistente;
- database ampio (15 tecnologie), contenente dati aggiornati e provenienti dal contesto geografico d'interesse;
- elevato numero di criteri decisionali utilizzati (15 parametri);
- prende in considerazione la tipologia dei difetti della condotta da risanare;
- accurata validazione del sistema.

Utilizzando i criteri descritti nel lavoro di ricerca [12] e riportati nella Sezione 2.1, l'algoritmo sviluppato:

- è un modello generale, cioè in grado di valutare condotte sia acquedottistiche che fognarie;
- integra i primi tre requisiti fondamentali per un modello accurato:
  - elabora i dati sulle condizioni della tubazione da risanare;
  - considera più tecnologie;

- esegue una valutazione tecnica delle specifiche condizioni di progetto;
- utilizza dati provenienti dall'area geografica d'interesse.

Tuttavia, attualmente il sistema proposto ha le seguenti carenze, le quali corrispondono alle ultime due funzionalità richieste ad un modello efficace:

- non esegue un'analisi dei costi diretti e indiretti;
- non effettua la classificazione delle tecnologie selezionate dalla più alla meno appropriata.

Sia la valutazione economica che la classificazione delle tecnologie compatibili rivestono un ruolo di grande importanza nel processo decisionale; pertanto, la loro integrazione nel sistema sviluppato rappresenta una naturale evoluzione del presente progetto di tesi.

I possibili sviluppi futuri vengono illustrati nella Sezione 6.2.

# Capitolo 3

## Tecnologie di risanamento

### 3.1 Riabilitazione delle condotte

Per poter descrivere il panorama del risanamento delle condotte mediante tecnologie *trenchless*, è necessario definire la seguente terminologia utilizzata nella letteratura di settore: il termine anglosassone *lining* (o *relining*) indica il processo di risanamento di una condotta mediante l'inserimento di materiali all'interno della tubazione stessa. Terminati i lavori, la nuova tubazione viene denominata *liner* [11].

La norma UNI EN ISO 11295:2022 [17] (Sistemi di tubazioni di materia plastica utilizzati per il rinnovamento delle condotte - Classificazione e quadro generale delle attività strategiche, tattiche e operative) definisce le fasi dell'intero processo di *Rehabilitation* delle condotte; questo documento comprende:

- la classificazione internazionale per le tecnologie di riabilitazione delle condotte, riportata nella Sezione 3.2;
- la classificazione strutturale dei *liner* per tubi in pressione, illustrata in Figura 3.1 e Figura 3.2;
- la definizione delle famiglie di tecnologie di risanamento, con la descrizione delle rispettive caratteristiche;
- varie informazioni riguardo la valutazione delle condizioni della condotta esistente, il processo di selezione della tecnologia, la progettazione e l'applicazione delle attività operative.

In base alla loro azione strutturale, i *liner* in pressione vengono classificati in:

- Classe A, pienamente strutturali: *liner* indipendenti, in grado di resistere in maniera autonoma a tutti i carichi interni applicabili durante la vita di progetto. Può essere un'installazione non aderente (*loose-fit*) o aderente (*close-fit*);

- Classe B o C, semi-strutturali: *liner* interattivi, non in grado di resistere in maniera autonoma a tutti i carichi interni, pertanto si affidano alla condotta esistente per un certo grado di supporto radiale. Un *liner* di Classe B è autoportante quando il tubo è depressurizzato mentre uno di Classe C non lo è. In entrambi i casi, si tratta di un'installazione aderente;
- Classe D, non strutturali (non oggetto della norma in questione).

Liner characteristics		Class A	Class B	Class C	Class D <sup>a</sup>
Independent pressure pipe liner	Fully structural				
	— Can survive internally or externally induced (burst, bending or shear) failure of host pipe	+			
	— Long-term pressure rating $\geq$ maximum allowable operating pressure (PFA) <sup>b</sup>	+			
Interactive pressure pipe liner	Semi-structural				
	— with inherent ring stiffness <sup>c, d</sup>		+		
	— with long-term hole and gap spanning at PFA <sup>e</sup>		+	+	
	Non-structural <sup>f</sup>				+

+ applies

<sup>a</sup> This document is not applicable to non-structural renovation (Class D liners).

<sup>b</sup> Maximum allowable operating pressure is specified as a function of pipe material in the technique-related parts of ISO 11297, ISO 11298 and ISO 11299 series.

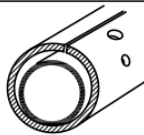
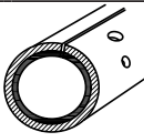
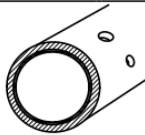
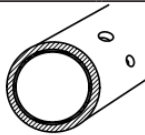
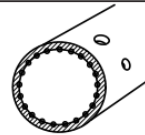
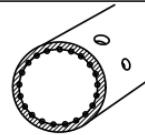
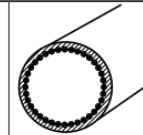
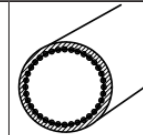
<sup>c</sup> The minimum requirement is for the liner to be self-supporting when the pipe is depressurized.

<sup>d</sup> Class C and Class D liners rely on adhesion to the host pipe when depressurized.

<sup>e</sup> The liner becomes sufficiently close-fit for radial transfer of internal pressure stress to the host pipe, either during installation or within a short period from initial application of operating pressure.

<sup>f</sup> The liner serves as barrier to the corrosion, abrasion and/or tuberculation/scaling of the host pipe and to the contamination of the pipe contents by the host pipe; it also generally reduces surface roughness for improved flow capacity.

Figura 3.1: Classificazione strutturale dei *liner* in pressione [17]

Class A		Class B		Class C		Class D	
							
loose-fit	close-fit	inherent ring stiffness	inherent ring stiffness	relies on adhesion	relies on adhesion	relies on adhesion	relies on adhesion
<b>Independent</b>				<b>Interactive</b>			
<b>Fully structural</b>				<b>Semi structural</b>		<b>Non structural</b>	
Lining with continuous pipes			—				This document is not applicable
Lining with discrete pipes			—				
	Lining with close-fit pipes		—				
	Lining with cured-in-place pipes						
	—	Lining with sprayed polymeric materials		Lining with adhesive-backed hoses			
—	—						

NOTE 1 Classification of lining with inserted hoses is yet to be determined, pending development of product standards for this technique family.

NOTE 2 Dots in illustrations for Classes C and D depict required adhesion.

Figura 3.2: Classificazione strutturale dei *liner* in pressione e corrispondenza con le famiglie di tecnologie [17]

Di conseguenza, si differenziano tre categorie interventi di risanamento:

- completamente strutturale: utilizzo di un *liner* indipendente in grado di resistere a tutti i carichi esterni indipendentemente dalle condizioni della condotta esistente;
- semi-strutturale: utilizzo di un *liner* interattivo in grado di coprire fori e fessure a lungo termine;
- non strutturale: utilizzo di un *liner* interattivo che non è in grado di coprire fori e fessure a lungo termine [17].

## 3.2 Classificazione delle tecnologie di risanamento

Le tecnologie di risanamento (o riabilitazione) *trenchless* esistenti sul mercato sono numerose; ciascuna di esse presenta caratteristiche, limitazioni e vantaggi differenti, i quali costituiscono i criteri principali nel processo selezione della tecnologia più adeguata per lo specifico progetto.

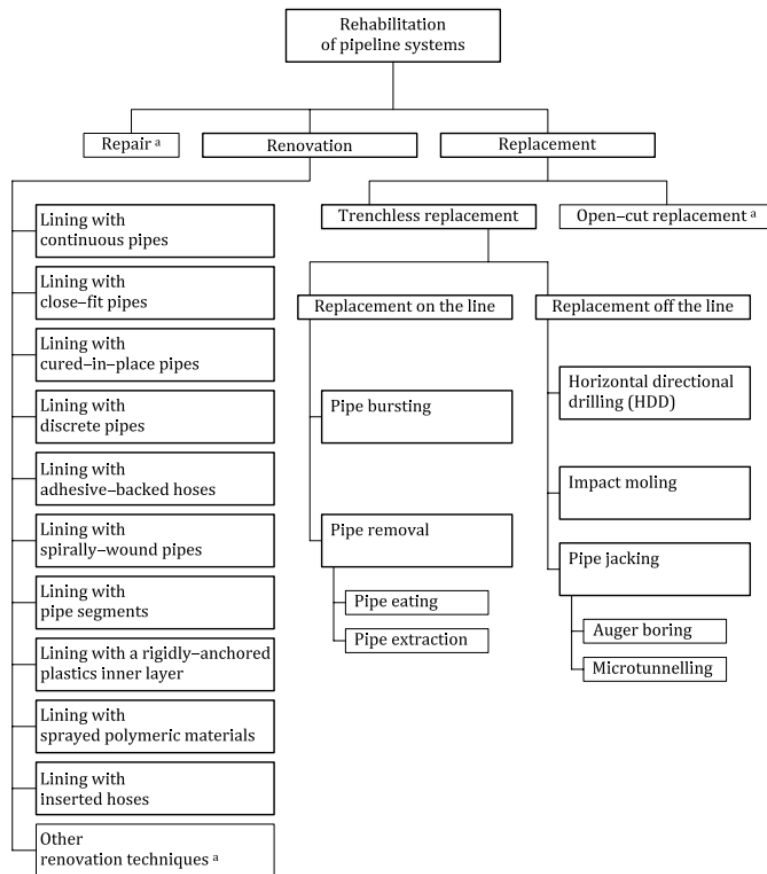
La classificazione delle tecnologie di riabilitazione presentata dalla norma UNI EN ISO 11295:2022, illustrata in Figura 3.3, distingue le tre seguenti macro categorie:

- *Renovation* (rinnovamento): tecnologie necessarie per incorporare in tutto o in parte la tubazione originaria, recuperandone o incrementandone le prestazioni;
- *Repair* (riparazione): tecnologie e operazioni idonee alla riparazione di danni localizzati;
- *Replacement* (sostituzione): tecnologie che comportano l'installazione di una nuova tubazione senza il mantenimento di quella originaria, laddove la funzione della nuova condotta incorpori quella della vecchia [17].

La classificazione presentata dalla normativa raggruppa le diverse famiglie di tecnologie all'interno delle macro-categorie in modo differente rispetto alla classificazione generale proposta da IATT (illustrata in Figura 1.4); ad esempio, lo *slip-lining* viene indicato come tecnologia di rinnovamento dalla norma, mentre secondo IATT è una tecnologia di sostituzione.

Dato che il presente lavoro si colloca nell'ambito del risanamento, viene osservata la classificazione riportata dalla norma UNI EN ISO 11295:2022.

Di seguito vengono esaminate e descritte diverse famiglie di tecnologie *no-dig* per la riabilitazione delle condotte; ogni famiglia comprende tecniche con caratteristiche comuni tra loro. Alcune tecnologie sono state intenzionalmente escluse da questa analisi a causa del loro limitato utilizzo.



Key  
 a Outside the scope of this document.

Figura 3.3: Classificazione delle tecnologie *no-dig* nel contesto del risanamento di sistemi di condotte [17]

### 3.2.1 Tecnologie di rinnovamento

**CIPP** Il gruppo di tecniche denominato CIPP, acronimo di *Cured In Place Pipe* (tubo polimerizzato in loco), comprende le tecnologie *no-dig* che permettono di rinnovare condotte esistenti tramite l’inserimento di un tubo flessibile impregnato di resina termoindurente, il quale viene polimerizzato in loco e prende la forma della tubazione ospite. Il tubo flessibile, comunemente chiamato calza o *liner*, è un tubolare plastico composito, eventualmente rivestito con una membrana plastica, costituito da un substrato rinforzato o non rinforzato che viene impregnato di resina termoindurente.

Il processo di polimerizzazione (o indurimento) della calza può avvenire mediante:

- calore (tramite acqua o aria-vapore);
- fotocatalisi (tramite raggi UV).

A seconda del procedimento di inserimento del tubolare, si distinguono:

- installazione a inversione (tramite pressione d’acqua o aria);

- installazione per traino (con l'ausilio di un argano).

Le tecnologie CIPP permettono di rinnovare completamente la condotta ospite, garantendo migliorie statiche e idrauliche [18].

**Close-fit lining** La famiglia *close-fit lining* comprende le tecnologie definite come *relining* con un tubo continuo in materiale plastico la cui sezione trasversale viene ridotta per facilitarne l'inserimento e, dopo l'installazione, sottoposta a reversione con lo scopo di riprendere la sua forma originaria, garantendo perfetta aderenza alla tubazione ospite. La riduzione della sezione trasversale può essere ottenuta tramite due metodi differenti:

- riduzione nell'impianto del produttore di tubi: il tubo, piegato per assumere una forma a "C", è avvolto su una bobina dalla quale viene inserito direttamente;
- riduzione in cantiere: il tubo attraversa un dispositivo di riduzione del diametro, chiamato *rig*, e viene inserito simultaneamente.

Dato che il nuovo tubo è perfettamente aderente alla condotta ospite, la riduzione della sezione trasversale è limitata al solo spessore dello stesso [17, 11].

**Slip-lining** Con il termine *slip-lining* ci si riferisce tipicamente al *relining* mediante inserimento di tubi continui (resi continui prima dell'inserimento); l'inserimento può essere effettuato per spinta o per traino. Il risanamento avviene mediante una condotta continua *loose-fit*, cioè di diametro esterno inferiore rispetto al diametro interno del tubo ospite: di conseguenza, tra *liner* e vecchio tubo rimane uno spazio chiamato *annulus* che viene tipicamente riempito con malta. La presenza di questa intercapedine comporta un significativo restringimento della sezione trasversale della condotta, riducendo così la capacità idraulica [17, 11].

**Hose lining** L'*hose lining* consiste nell'inserimento, all'interno della condotta ospite, di un tubolare flessibile. Questo può essere costituito da un monostrato plastico, solitamente in PE (polietilene), oppure da una struttura multistrato, composta da due o più strati plastici. Per facilitare l'inserimento, il quale avviene per traino, il tubolare viene piegato con una forma a "U"; successivamente avviene la reversione del *liner*, applicando una pressione interna mediante aria compressa. Questa tecnologia è applicabile esclusivamente a condotte in pressione ed è caratterizzata dalla possibilità di effettuare risanamenti con elevate lunghezze di installazione, anche in presenza di significative variazioni plano-altimetriche [17].

**Discrete pipes lining** Il *Discrete pipes lining*, o inserimento di tubi a segmenti, è definito come l'inserimento interno di tubi più brevi della sezione da risanare, che vengono uniti per giunzione a formare una tubazione

continua durante l'inserimento. L'installazione può avvenire a spinta, per traino o per posizionamento del singolo segmento. Anche questa tecnologia comporta la presenza di un'intercapedine tra nuovo tubo e condotta ospite [17]. Tipicamente, il materiale dei nuovi tubi è il P.R.F.V. (Plastica Rinforzata con Fibre di Vetro); pertanto, in questi casi, tale tecnologia viene anche denominata "*relining* con tubi in P.R.F.V."

**Rivestimenti applicati a spruzzo** La famiglia dei rivestimenti applicati a spruzzo comprende tecnologie di rinnovo accomunate dallo stesso principio applicativo. Il risanamento avviene per mezzo di un macchinario a testa rotante che, percorrendo la condotta, spruzza il materiale (stoccato in serbatoi) sulla superficie interna della tubazione. Lo spessore minimo del rivestimento è tipicamente di 3 mm.

Il metodo utilizzato tradizionalmente, detto *Cement Mortar Lining* (CML), consiste nell'applicazione di malta cementizia. Il CML ricostruisce il rivestimento interno senza fornire alcun supporto strutturale; le finalità principali sono la protezione di tubazioni metalliche dalla corrosione di origine interna e la riduzione della scabrezza.

Un'alternativa consiste nello *spray lining*, ossia il rivestimento a spruzzo mediante l'applicazione di resine a base di poliurea o epossidiche; in base allo spessore del materiale applicato, lo *spray lining* permette di ottenere una riabilitazione semi-strutturale [17, 11].

***Spiral wound lining*** Lo *spiral wound lining*, o rivestimento a spirale continua, consiste nell'inserimento nella condotta da risanare di un nastro profilato che viene avvolto a spirale fino a creare un tubo continuo dopo l'installazione. Il nastro può essere in PVC-U (policloruro di vinile non plastificato) o PE, con eventualmente l'aggiunta di un rinforzo in acciaio. L'inserimento può avvenire mediante avvolgimento:

- dalla camera di accesso:
  - a diametro fisso;
  - a diametro espanso;
- dall'interno della tubazione, tramite una macchina avvolgitrice che avanza lungo il tubo.

Questa tecnologia, applicabile esclusivamente in tubazioni con funzionamento a pelo libero, permette di ottenere una nuova condotta *loose-fit* o *close-fit*, a seconda della modalità di installazione [17].

***TIP-method (Tight In Pipe)*** La tecnologia TIP, acronimo di *Tight In Pipe*, permette il risanamento di una condotta esistente tramite l'inserimento di una tubazione aderente; vengono utilizzati tubi plastici in PP (polipropilene) o in PE. Il vantaggio di questa tecnologia risiede nell'utilizzo di una testa di calibrazione per rimodellare le deformazioni (fino al 25%)

e i disallineamenti (fino al 10%) della condotta esistente, ripristinandone la forma originale; di conseguenza, il *TIP-method* permette di riabilitare condotte fortemente deteriorate. L'inserimento della testa di calibrazione, alla quale è agganciata la nuova tubazione (continua o a segmenti), viene effettuato per traino dalla sezione di arrivo o per spinta da quella di partenza [7].

### 3.2.2 Tecnologie di sostituzione

La sostituzione di una condotta esistente può essere svolta in linea (*on the line*) o fuori linea (*off the line*) rispetto alla stessa. Per questa categoria di tecniche è necessario tenere in considerazione la presenza di altri sottoservizi, al fine di ridurre al minimo il rischio di danni collaterali [17].

***Pipe bursting (Berstlining)*** Il *pipe bursting*, letteralmente scoppio di tubi, consente la sostituzione in linea di una condotta esistente con una nuova, avente diametro uguale o maggiore rispetto alla condotta originaria (possibilità di incrementare il diametro di oltre 30%). La sostituzione avviene per mezzo di una testa di frantumazione, la quale viene inserita per traino o per spinta. L'avanzamento della testa frantuma il tubo esistente spingendone i frammenti nel terreno circostante; contemporaneamente, viene posizionata la nuova condotta, la quale è agganciata alla testa di frantumazione. La condotta inserita può essere sia continua che a segmenti [17, 11]. A seconda del metodo di frantumazione della tubazione esistente si distinguono:

- *Pipe bursting* statico: vengono utilizzati dei semplici espansori (coni di espansione);
- *Pipe bursting* dinamico: la testa frantuma il tubo mediante azione percussiva [5].

### 3.2.3 Tecnologie di riparazione

Le tecniche appartenenti alla categoria delle riparazioni puntuali vengono prese in considerazione laddove una tubazione presenti danni localizzati. La scelta di effettuare un intervento di riparazione mirato può permettere un risparmio economico rispetto al risanamento di un'intera tratta tra due punti di accesso [16].

**Risanamento manuale** La famiglia del risanamento manuale comprende diverse tecniche in grado di aumentare la vita utile di condotte esistenti, tra le quali riparazione di crepe e giunti, rimozione di radici e depositi, sistemazione del profilo della condotta, iniezione di resine, applicazione di malte speciali e molte altre. Questi metodi sono applicabili in tutte le tubazioni accessibili all'uomo, cioè aventi diametro nominale  $DN \geq 800$  mm [29].

**Iniezioni con robot** L'utilizzo di robot semoventi all'interno delle condotte ha un'ampia gamma di applicazioni, tra cui le attività di fresatura di oggetti sporgenti e i lavori di riparazione di crepe, fori, giunti o allacciamenti laterali mediante iniezione di resina. Si tratta di sistemi robotici dotati di telecamera, necessaria per il controllo della corretta esecuzione delle operazioni. I robot permettono di effettuare interventi di riparazione in condotte non accessibili all'uomo [29].

**Manicotti interni** Il termine manicotti interni indica i sistemi di tenuta interna delle tubazioni; questi sistemi di sigillatura sono finalizzati alla riparazione a chiusura ermetica di eventuali difetti di tenuta presenti nella condotta esistente. I manicotti sono anche utilizzabili come anello di tenuta terminale per varie tipologie di *liner* [29].

### 3.3 Processo decisionale di selezione della tecnologia di risanamento

Come anticipato nel Paragrafo 1.3.1, la selezione della tecnologia *trenchless* più adeguata rappresenta una fase cruciale nella progettazione di un intervento di risanamento di una condotta. Il processo decisionale coinvolto si articola nei seguenti passi:

1. definizione del problema:
  - (a) indagine delle condizioni della condotta esistente e del sito di progetto;
  - (b) definizione dei requisiti prestazionali;
  - (c) individuazione delle carenze di prestazione, tramite la valutazione delle condizioni rispetto ai requisiti stabiliti;
2. pre-selezione delle tecnologie applicabili, identificate in base a:
  - (a) compatibilità con i difetti della condotta;
  - (b) confronto tra le caratteristiche del progetto e le limitazioni di ogni tecnologia;
3. selezione della tecnologia più appropriata, attraverso:
  - (a) considerazioni economiche (analisi costi-benefici, budget disponibile);
  - (b) dettagliata verifica di adeguatezza della tecnologia per lo specifico progetto;
  - (c) disponibilità e affidabilità dei fornitori.

Pertanto, un'accurata selezione è una questione complessa che dipende da numerosi fattori [16, 17].

# Capitolo 4

## DSS sviluppato

### 4.1 Introduzione

L'importanza dell'adozione di un sistema automatico per la selezione della tecnologia *trenchless* per il risanamento delle condotte è stata discussa nel Paragrafo 1.3.1. Il presente capitolo illustra in maniera approfondita il sistema di supporto decisionale sviluppato per fornire supporto per le decisioni preliminari; pertanto, ha lo scopo di identificare le tecnologie tecnicamente applicabili per ogni specifico progetto. Si tratta di un modello:

- deterministico (*rule-based*);
- generale (applicabile a condotte acquedottistiche, fognarie e non solo).

Il DSS si articola in due componenti principali:

- il database contenente le caratteristiche delle tecnologie di risanamento, strutturato in un file Excel;
- l'algoritmo di selezione, implementato tramite codice Python.

L'intero sistema si configura come un'applicazione desktop *stand-alone*. Quest'applicazione, dotata di interfaccia grafica interattiva (GUI, *Graphical User Interface*), è compatibile con i sistemi operativi Microsoft Windows e permette di:

- inserire gli Input, ossia le caratteristiche del progetto da esaminare;
- generare automaticamente l'Output, un report PDF contenente l'elenco delle tecnologie tecnicamente compatibili in base ai dati di progetto acquisiti.

La Figura 4.1 illustra la rappresentazione schematica del sistema sviluppato.

Secondo la nomenclatura adottata nelle norme tecniche, nei paragrafi successivi la condizione di moto a superficie libera sarà indicata come condizione di moto per "gravità", anche se è ben noto che il moto a gravità riguarda sia il moto a superficie libera sia il moto in pressione.

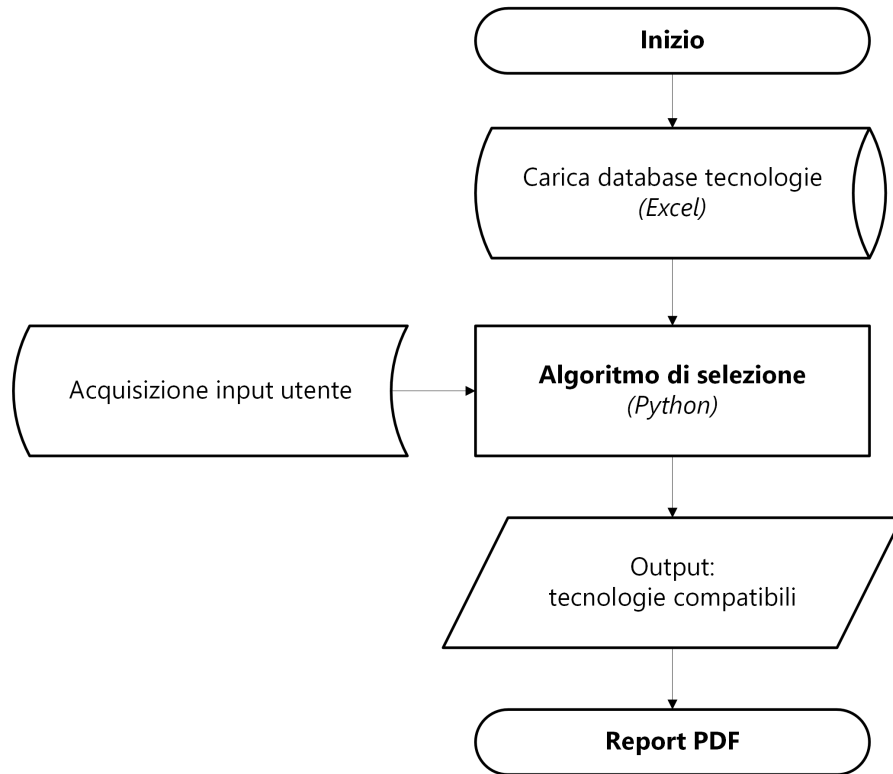


Figura 4.1: Struttura del DSS sviluppato

## 4.2 Database

Il database è strutturato in modo organizzato in un file *.xlsx* (Microsoft Excel) e contiene le caratteristiche tecniche di ciascuna delle tecnologie di risanamento *trenchless* elencate nella Tabella 4.1. All'interno delle singole famiglie di tecnologie descritte nella Sezione 3.2, sono state separate tecniche specifiche aventi caratteristiche di applicabilità differenti.

Nella famiglia delle tecnologie CIPP si differenziano:

- "CIPP UV": polimerizzazione per fotocatalisi e inserimento per traino;
- "CIPP a inversione": polimerizzazione per calore e inserimento a inversione.

Queste due tecnologie specifiche sono state ulteriormente separate in "a gravità" e "in pressione", poiché le loro caratteristiche variano significativamente in base al tipo di funzionamento della rete.

Per quanto riguarda il *close-fit lining*, in base al metodo di riduzione della sezione trasversale del tubo, si distinguono due tecnologie con caratteristiche di applicabilità differenti:

- "*Close-fit* - Costrizione radiale": riduzione temporanea del diametro in cantiere tramite il passaggio attraverso una matrice tronco-conica (*rig*);

- "*Close-fit* - Tubi pre-deformati": riduzione nell'impianto del produttore di tubi (forma a "C").

Tabella 4.1: Elenco delle tecnologie di risanamento presenti nel database

<b>Tecnologie di risanamento</b>
CIPP UV (a gravità)
CIPP UV (in pressione)
CIPP a inversione (a gravità)
CIPP a inversione (in pressione)
Close-fit - Costrizione radiale
Close-fit - Tubi pre-deformati
Slip-lining
Hose lining
Discrete pipes (relining P.R.F.V.)
Cement Mortar Lining (CML)
Spray lining (rivestimento con resine)
Spiral wound lining
Pipe bursting (Berstlining)
TIP-method (Tight In Pipe)
Risanamento manuale
Iniezioni con robot
Manicotti interni

Infine, coerentemente con il Paragrafo 3.2.1, tra i rivestimenti applicati a spruzzo vengono considerati i seguenti metodi:

- *Cement Mortar Lining* (CML);
- *Spray lining* (rivestimento con resine).

Per ogni tecnologia sono state ricercate e acquisite informazioni relative alle caratteristiche tecniche, in modo da poter confrontare i limiti di ciascuna tecnologia con i requisiti di applicabilità di progetto. Le informazioni presenti nel database provengono da diverse fonti, tra cui:

- norma UNI EN ISO 11295:2022 [17];
- linee guida tecniche (*Merkblatt*) emanate da RSV (*Rohrleitungssanierungsverband*), l'associazione tedesca per il risanamento *trenchless* delle condotte;
- manuali di settore [11, 5, 16];

- guide tecniche di IATT [34] e di Rotech [29];
- prassi di riferimento dedicate a specifiche famiglie di tecnologie:
  - UNI/PdR 175:2025 per CIPP a gravità [18];
  - UNI/PdR 37:2018 per rivestimenti con malte cementizie o resine [20];
- schede tecniche e manuali ottenuti direttamente dai fornitori delle tecnologie.

Nei paragrafi successivi vengono descritti la struttura del database e i parametri (o caratteristiche) tecnici associati a ciascuna tecnologia.

### 4.2.1 Struttura del database

Il database è strutturato in un file Excel organizzato in tre fogli, ognuno dei quali comprende determinate caratteristiche di ciascuna tecnologia: il foglio "Principale" contiene le informazioni relative a tutti i parametri tecnici, tranne quelle riferite alla pressione di esercizio e alla curvatura; per questi ultimi sono stati creati due fogli dedicati "Curvatura" e "Pressione", poiché per molte tecnologie i valori corrispondenti a questi parametri variano al variare di altri fattori (ad es. diametro o tipo di funzionamento della condotta esistente).

Il foglio "Principale" è strutturato come segue:

- la prima colonna riporta il nome di ciascuna tecnologia di risanamento;
- la riga di intestazione contiene i nomi dei diversi parametri tecnici;
- le altre celle contengono il valore associato alla tecnologia  $i$ -esima e al parametro  $j$ -esimo, in base, rispettivamente, alla riga e alla colonna della cella  $(i, j)$ .

A seconda del tipo di parametro, i valori ad esso associati possono essere:

- numerici (es. diametro minimo);
- Sì, No, Limitato/a (es. necessità di scavo per accesso);
- elenchi testuali (es. materiali risanabili).

Tramite la funzione "Convalida dati", presente in Microsoft Excel, è possibile porre delle restrizioni sul tipo di dati da inserire in una determinata cella; tale funzione è stata applicata in maniera distinta per ogni parametro, in modo da garantire l'uniformità e la validità dei dati presenti nel database.

Il foglio "Curvatura", invece, è strutturato come segue. La prima colonna è organizzata come nel foglio "Principale"; nella riga di intestazione sono presenti i seguenti parametri:

- Funzionamento: i possibili valori sono "Gravità", "Pressione" o "Tutti";
- Diametro minimo [mm];
- Diametro massimo [mm];
- Curvatura [°].

In questo foglio, ogni riga rappresenta una specifica combinazione di tecnologia, funzionamento e intervallo di diametro. Per ciascuna combinazione, la colonna "Curvatura" indica il valore del massimo angolo di curvatura supportato dalla tecnologia quando:

- il funzionamento della condotta corrisponde a quello specificato nella riga (pressione, gravità o entrambi);
- il diametro della condotta rientra nell'intervallo  $[DN_{\min}, DN_{\max}]$  indicato.

Questa struttura implica il fatto che nella prima colonna si possa ripetere più volte la stessa tecnologia, poiché in ogni riga l'informazione sulla curvatura sarà associata a un diverso funzionamento e/o a un intervallo di diametri differente.

Il foglio "Pressione" è strutturato come il precedente; tuttavia, in questo caso i parametri presenti nella riga di intestazione sono:

- Rete: i possibili valori sono "Acquedotto", "Fognatura" o "Tutti";
- Diametro minimo [mm];
- Diametro massimo [mm];
- Pressione [bar].

Questo foglio fornisce informazioni riguardo alla massima pressione di esercizio supportata dalla tecnologia, per determinati valori di diametro e tecnologia di rete.

#### 4.2.2 Parametri delle tecnologie

Nel presente paragrafo vengono descritti i vari parametri tecnici presenti nel database, associati ad ogni tecnologia. I tipi di parametri da considerare sono stati selezionati sulla base dell'analisi bibliografica dei DSS esistenti, nonché grazie alla consultazione di manuali e normative di settore e in base alle conoscenze attualmente a disposizione in merito agli argomenti di seguito trattati. Si tratta di caratteristiche tecniche, le quali permettono di determinare se una tecnologia è applicabile o meno per un determinato progetto di risanamento.

Di seguito sono illustrati tutti i parametri presenti nel database.

**Tipo di rete** Una delle caratteristiche fondamentali di una tecnologia è il suo ambito di applicazione, ossia il tipo di rete in cui la tecnica può essere impiegata. Per quanto riguarda questo parametro, nel database sono presenti due colonne, "Acquedotto" e "Fognatura": in entrambe, la convalida dati permette di inserire solamente "Sì"/"No", indicando così la capacità di risanare o meno condotte acquedottistiche e/o fognarie.

**Funzionamento della rete** Il tipo di funzionamento idraulico distingue i sistemi in cui il fluido trasportato scorre a pelo libero da quelli in cui la corrente è in pressione. Analogamente al parametro precedente, nel database sono presenti due colonne, "Pressione" e "Gravità": in entrambe si può inserire solamente "Sì"/"No".

**Difetti della condotta** È fondamentale considerare la capacità delle tecnologie di risolvere i difetti specifici di cui soffre la condotta. I difetti considerati sono i seguenti, tra parentesi è indicata la sigla da inserire nel database:

- Infiltrazioni/Esfiltrazioni (IE);
- Separazione dei giunti (SG);
- Corrosione (COR);
- Fessure/Fori (FF);
- Problemi ai giunti (PG);
- Problemi strutturali (PS);
- Capacità idraulica inadeguata (CII).

Nella colonna "Difetti\_risanabili" viene riportato l'elenco dei tipi di danni che la tecnologia è in grado di risanare. Nel caso in cui l'impiego di una tecnologia sia adatto in misura marginale alla risoluzione di un problema specifico, nella cella corrispondente alla tecnica in questione viene inserita la sigla di tale difetto seguita da "\_M" ad indicarne l'adeguatezza marginale; ad esempio, nella cella verrebbe inserito "IE,PG\_M" in caso di capacità nel risolvere il problema di "Infiltrazioni/Esfiltrazioni" e di capacità marginale nel risolvere "Problemi ai giunti".

Nel corso dello sviluppo del sistema sono state esaminate ulteriori tipologie di difetti, tra cui il disallineamento, la deformazione e la riduzione della sezione trasversale della condotta esistente; tuttavia, in questa fase di sviluppo dell'algoritmo, questi specifici difetti non sono stati considerati a causa della difficoltà riscontrata nel definire regole univoche di compatibilità tecnica rispetto a tali condizioni.

**Classe di danno** La norma tedesca DWA-A 143-2:2015 (*Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren*) definisce la classificazione delle condotte interrato dal punto di vista statico, come riportato in Figura 4.2; distingue le seguenti categorie in base alle condizioni del vecchio tubo:

- I: vecchio tubo autoportante nel terreno;
- II: il sistema terreno + vecchio tubo è autoportante;
- III: il sistema terreno + tubo non è più autoportante sul lungo periodo (ad es. incrinature longitudinali con deformazioni significative del tubo  $\delta_v \geq 6\%$ );
- IIIa: vecchio tubo affetto da frantumazione pronunciata (assimilabile a ghiaia compattata) [6].

Vecchio tubo	Condizione del vecchio tubo			
	I	II	III	IIIa (per informazioni cfr. Allegato K)
Sufficiente <sup>1)</sup> resistenza alla trazione da flessione $\sigma_{Z,AR}$	+	-	-	-
Sistema terreno+vecchio tubo a riposo e rigido	+	+	-	-
Sufficiente <sup>1)</sup> resistenza alla compressione $\sigma_{D,AR}$	+	+	+	-
NOTE <sup>1)</sup> Sufficiente ai sensi della Tabella 18 e 19, controllo con fattori di sicurezza parziale.				

Figura 4.2: Definizione delle condizioni del vecchio tubo da I a IIIa [6]

Nel sistema sviluppato, la condizione della condotta esistente classificata in classe di danno IIIa non è stata esplicitamente considerata seppur presente in normativa. Tale scelta deriva dal fatto che situazioni caratterizzate da questo livello di degrado richiedono approfondite valutazioni tecnico-strutturali e analisi puntuali del danno, che esulano dalle finalità di supporto decisionale preliminare proprie dello strumento proposto e che comunque non escludono nessuna tecnologia. Resta tuttavia possibile prevederne l'integrazione in futuri sviluppi del sistema, mediante l'ampliamento dei criteri di valutazione e dei parametri di input.

Nel database è presente la colonna "Classi\_danno\_compatibili", nella quale viene inserito l'elenco delle classi di danno della condotta esistente per cui la tecnologia è applicabile.

Inoltre, è presente la colonna "Classe\_statica\_liner", in cui viene riportata la classificazione strutturale del *liner* (classe A, B, C o D), definita dalla norma UNI EN ISO 11295:2022 e riportata nella Sezione 3.1. Questa colonna è inserita nel database a titolo informativo; infatti, dato che alle tecnologie di riparazione non è associata una classe statica, per la valutazione delle tecnologie viene utilizzata la colonna "Classi\_danno\_compatibili".

In base alle condizioni del vecchio tubo è stabilita la minima categoria intervento di risanamento necessaria:

- classe III: è richiesto un intervento di risanamento completamente strutturale;
- classe II: è necessario un risanamento semi-strutturale;
- classe I: è sufficiente un intervento di riabilitazione non-strutturale.

Ovviamente, è possibile optare per una tipologia di intervento con finalità maggiormente strutturali rispetto al necessario (ad es. un *liner* di classe A per una condotta in classe di danno II); non è altrettanto valido il contrario (ad es. un *liner* classe C non soddisfa i requisiti per risanare una tubazione in classe di danno III).

**Forma della sezione trasversale** La forma della sezione trasversale è un parametro fondamentale che si riferisce alla geometria della condotta esistente. Tutte le tecnologie presenti nel database sono compatibili con condotte circolari; solo alcune di esse sono applicabili in condotte aventi forme differenti. La colonna "Forma\_sezione\_trasversale" riporta l'elenco delle forme compatibili con la specifica tecnica, tra cui:

- circolare;
- ovoidale;
- policentrica;
- rettangolare.

Nel caso in cui una tecnologia non abbia limitazioni intrinseche per quanto riguarda la forma della sezione trasversale, nel database viene inserito "Tutte".

**Diametri risanabili** Per quanto riguarda l'intervallo di diametri risanabili da ogni tecnologia, nel database sono presenti due colonne, "DN\_minimo" e "DN\_massimo": contengono i valori minimo e massimo, in [mm], dell'intervallo di DN (Diametro Nominale) per cui la tecnologia è applicabile.

**Requisiti di scavo** Alcune tecnologie possono essere installate attraverso pozzetti preesistenti, se presenti; altre, invece, richiedono l'apertura di scavi per il processo di installazione. Nel database, la colonna "Necessità\_di\_scavo\_per\_accesso" può contenere i seguenti valori:

- Sì: necessità di scavare per aprire fosse di accesso;
- No: possibilità di installazione da pozzetti esistenti (se presenti);
- Limitato: la necessità di scavo dipende fortemente dalle condizioni specifiche di progetto e del sito.

Inoltre, possono essere inserite regole condizionali che indicano che l'apertura di fosse di accesso è necessaria a partire da un determinato valore di diametro; ad esempio, se nella colonna viene inserito  $DN > 800$  vuol dire che la tecnologia necessita l'apertura di fosse di accesso per condotte aventi  $DN > 800$  [mm].

Trattandosi di tecnologie *no-dig*, nessuna di esse necessita l'apertura di trincee.

**Lancio massimo** Con il termine lancio massimo viene indicata la massima lunghezza risanabile mediante un singolo inserimento, effettuato quindi da un solo punto di installazione. Nella colonna "Lancio\_massimo" vengono inseriti valori in [m]. Per le riparazioni puntuali non viene assegnato un valore relativo a questo parametro.

Nella realtà, i valori di lancio massimo dipendono fortemente da diversi fattori, tra cui il diametro della condotta, il numero e la severità delle eventuali curve presenti nella tratta da risanare, la scelta produttore e i limiti del materiale utilizzato. Tuttavia, non è stato possibile considerare queste correlazioni nel database, poiché le fonti indicate non riportano relazioni o tabelle che indicano il variare del lancio massimo in funzione di tali fattori.

Di conseguenza, il valore indicato nel database si riferisce alla massima lunghezza risanabile mediante un singolo inserimento nelle migliori condizioni. La caratterizzazione di questo parametro potrà comunque essere perfezionata in una fase successiva di sviluppo dell'algoritmo.

**Materiali risanabili** Il materiale della condotta esistente è un fattore che può restringere il campo di applicabilità di alcune tecnologie. I dati inseribili nella colonna "Materiali\_risanabili" sono:

- "Tutti": la tecnologia è compatibile con qualsiasi materiale;
- elenco di materiali separati da virgola (ad es. "acciaio,ghisa"): la tecnologia è compatibile con i materiali elencati;
- "Tutti\_Tranne:" seguito dall'elenco dei materiali non idonei.

**Allacciamenti e derivazioni laterali** Per riconnettere gli allacciamenti e le derivazioni laterali alla condotta principale le tecnologie possono richiedere il ripristino:

- dall'esterno, mediante l'apertura di uno scavo;
- dall'interno della tubazione, in maniera robotizzata o manuale a seconda delle dimensioni della condotta.

Alcune tecnologie, invece, non chiudono gli allacciamenti laterali e quindi non necessitano di ulteriori interventi di riapertura.

Nel database sono presenti due colonne, poiché a seconda del tipo di funzionamento della rete sono necessarie modalità di ripristino differenti:

"Scavo\_per\_riconessioni\_laterali\_pressione" e "Scavo\_per\_riconnesioni\_laterali\_gravità". Possono essere inseriti i seguenti valori:

- Sì: è necessario scavare per riconnettere gli allacciamenti e le derivazioni laterali;
- No: è possibile effettuare il ripristino dall'interno della tubazione, oppure la tecnologia non occlude gli allacciamenti;
- N/A: la tecnologia non è utilizzabile per questo tipo di funzionamento (pressione/gravità).

**Adattabilità a variazioni dimensionali** Le condotte ospitanti potrebbero presentare una variazione dimensionale nella sezione trasversale: questo accade se il diametro della tubazione esistente cambia almeno una volta tra due pozzetti (o fosse di accesso) consecutivi. Alcune tecnologie sono in grado di gestire queste variazioni. Nella colonna "Adattabilità\_variazioni\_DN\_ospite" ad ogni tecnologia possono essere assegnati i seguenti valori:

- Sì: è in grado di gestire transizioni dimensionali;
- No: richiede un DN relativamente costante.

**Mantenimento della variazione di diametro dopo il risanamento** Tra le tecnologie in grado di essere impiegate in condotte ospiti con variazioni di diametro, è necessario distinguere quelle che permettono di mantenere tale variazione nella condotta risanata da quelle che realizzano una tubazione a sezione costante.

Perciò, la colonna "Variazione\_DN\_risanamento" può contenere:

- Sì: la tecnologia è in grado di adattarsi alla variazione dimensionale, permettendo di mantenere la variazione di diametro dopo il risanamento;
- No: la tubazione risanata avrà diametro costante, inferiore o uguale al diametro minimo della condotta ospite.

Con lo scopo di spiegare la differenza tra questo parametro e il precedente, di seguito viene illustrato un esempio. Per la tecnologia *slip-lining*, che consiste nell'inserimento di tubi continui aventi diametro esterno inferiore al diametro interno del tubo ospite, il database riporta i seguenti valori:

- Adattabilità\_variazioni\_DN\_ospite = Sì: in presenza di una transizione dimensionale, è possibile inserire un nuovo tubo avente diametro esterno inferiore al minimo diametro interno della condotta;
- Variazione\_DN\_risanamento = No: la nuova tubazione ha DN costante; pertanto, non può essere presente nessuna variazione dimensionale nella condotta risanata.

**Riduzione del DN della condotta** Alcune tecnologie comportano una riduzione dell'area della sezione trasversale della condotta risanata; di conseguenza, si potrebbe verificare una diminuzione della capacità idraulica. Tuttavia, il risanamento della tubazione ne riduce la scabrezza, compensando così la diminuzione della sezione trasversale. Nella colonna "Riduzione\_DN\_condotta" del database possono essere inseriti i seguenti valori:

- Sì: spazio anulare tra nuova tubazione e condotta ospite. La tecnologia comporta una significativa riduzione dell'area della sezione trasversale;
- No: nessuna riduzione della sezione;
- Limitata: nuova tubazione aderente alla condotta esistente. Lieve riduzione dovuta allo spessore del nuovo tubo.

"No" è valido per le tecnologie (ad es. *pipe bursting*) che permettono anche un aumento del diametro della condotta e per le riparazioni puntuali che non provocano necessariamente una riduzione.

**Pressione di esercizio massima** Per le tecnologie in grado di risanare reti con funzionamento in pressione, viene fornito il massimo valore della pressione di esercizio supportato dalla tecnologia. Come anticipato nel Paragrafo 4.2.1, tale valore dipende da altri fattori, quali il diametro della tubazione e la tipologia di rete. Per questo motivo, il parametro in questione è trattato nel foglio dedicato ("Pressione").

**Grado di curvatura** Ogni tecnologia è in grado di gestire un determinato grado di curvatura. Nel database viene inserito il valore del massimo angolo gestibile, il quale può variare tra 0° e 90°.

### Parametri esclusi dal database

Certi parametri citati da fonti in letteratura non sono stati inseriti nel database poiché non è stato ritenuto che tali parametri forniscano un contributo significativo nel processo di selezione della tecnologia; ad esempio:

- i seguenti parametri sono ritenuti utili in fasi successive alla selezione, tra cui il dimensionamento del *liner*:
  - profondità della tubazione ospite;
  - pendenza della condotta esistente;
  - livello della superficie piezometrica della falda acquifera;
- la temperatura del fluido di esercizio è stata trascurata poiché si ritiene che tale parametro non comporti l'esclusione di alcuna tecnologia in scenari standard nell'ambito delle reti idrauliche;

- la tipologia di terreno viene considerata nel calcolo statico ed è utile per determinare lo spessore necessario del *liner*; tuttavia, dato che non permette di escludere a priori una tecnologia piuttosto che un'altra, questo parametro non viene inserito nell'algoritmo;
- il numero di allacciamenti laterali non è un requisito che restringe l'applicabilità di tecnologie specifiche, anche se ne condiziona costi e benefici.

Altri parametri, invece, sono stati esclusi poiché una loro definizione chiara nella fase di progetto preliminare risulterebbe troppo complicata:

- necessità e modalità di by-pass;
- estensione dell'area superficiale di lavoro richiesta.

Per questi ultimi è necessaria un'attenta valutazione della configurazione del sito di progetto.

## 4.3 Algoritmo

In informatica, un algoritmo è definito come una sequenza finita di operazioni elementari che, a partire da un insieme di dati in ingresso (input), produce come risultato un altro insieme di dati (output) che soddisfano requisiti preassegnati [31].

L'algoritmo sviluppato nel presente lavoro di tesi ha come input i parametri di progetto inseriti dall'utente e come output l'elenco delle tecnologie applicabili, cioè quelle che soddisfano i requisiti tecnici del progetto. Il sistema produce l'output, ossia l'elenco delle tecnologie in grado di eseguire il risanamento, mettendo a confronto le specifiche di progetto inserite (input) con le caratteristiche tecniche delle tecnologie (presenti nel database) attraverso criteri di filtraggio prestabiliti.

L'algoritmo di selezione è stato implementato in linguaggio Python (versione 3.13). Inoltre, è stata sviluppata un'interfaccia utente grafica (GUI) tramite CustomTkinter: l'interfaccia è stata progettata in modo da rendere semplice ed efficace l'utilizzo del programma da parte dell'utente. L'intero sistema è stato racchiuso in un'applicazione *stand-alone* (.exe) utilizzando PyInstaller, permettendo così la distribuzione del programma.

Nei seguenti paragrafi viene illustrato il processo di selezione delle tecnologie compatibili: nel Paragrafo 4.3.1 viene presentata l'interfaccia utente, riportando le schermate dell'applicazione e descrivendo gli input da inserire; nel Paragrafo 4.3.2 vengono descritti il procedimento ed i criteri di filtraggio.

### 4.3.1 Interfaccia utente

La prima schermata del programma, riportata in Figura 4.3, permette all'utente di inserire i dati necessari per avviare il processo: si tratta delle

informazioni relative al progetto da esaminare. Questa schermata comprende tre campi di testo: innanzitutto, è richiesto il nome del progetto al fine di memorizzarlo per nominare il file report finale. Il numero di tratte differenti è un parametro cruciale, poiché determina il numero di volte in cui l'algoritmo eseguirà il processo di filtraggio: se tale numero è superiore ad 1, nella schermata compare l'opzione "Le tratte sono fisicamente consecutive", da selezionare in caso affermativo. Il nome utente, invece, è un'informazione facoltativa che, se inserita, viene semplicemente riportata nel report PDF per completezza. La schermata presenta anche i seguenti pulsanti:

- "Avanti →": porta l'utente alla schermata successiva e simultaneamente elabora i valori inseriti;
- "Esci": chiude il programma senza salvare i dati inseriti.



Figura 4.3: Schermata di avvio del programma

Se uno o entrambi i campi "Nome del progetto" o "Numero di tratte differenti" rimangono vuoti, oppure se non viene inserito un numero di tratte valido (dev'essere maggiore di 0), il pulsante "Avanti →" non porta alla schermata successiva e viene visualizzata una scritta di errore che invita l'utente a inserire adeguatamente lo specifico valore mancante.

Una volta completato correttamente l'inserimento delle informazioni nella schermata di avvio e premuto il pulsante "Avanti →", il programma porta l'utente alla schermata successiva. In questo passo, e nei successivi, è presente un ulteriore pulsante:

- "← Indietro": permette all'utente di tornare alla schermata precedente per modificare i dati già inseriti.

La seconda schermata, illustrata in Figura 4.4, è finalizzata all'inserimento dei parametri tecnici della tratta in esame; questa tipologia di schermata si ripete una volta per ogni tratta presente nel progetto.

L'inserimento dei parametri tecnici è articolato in quattro sezioni.

**Prima sezione** La prima riguarda le caratteristiche della rete: in questa sezione vengono richiesti il tipo di rete e il suo funzionamento. Per il "Tipo di rete" sono presenti tre pulsanti di opzione: "Acquedotto", "Fognatura" e "Altro". Nel caso in cui venga selezionata l'opzione "Altro", nella schermata appare un campo di testo all'interno del quale bisogna specificare il tipo di rete (ad esempio condotta forzata per impianto idroelettrico).

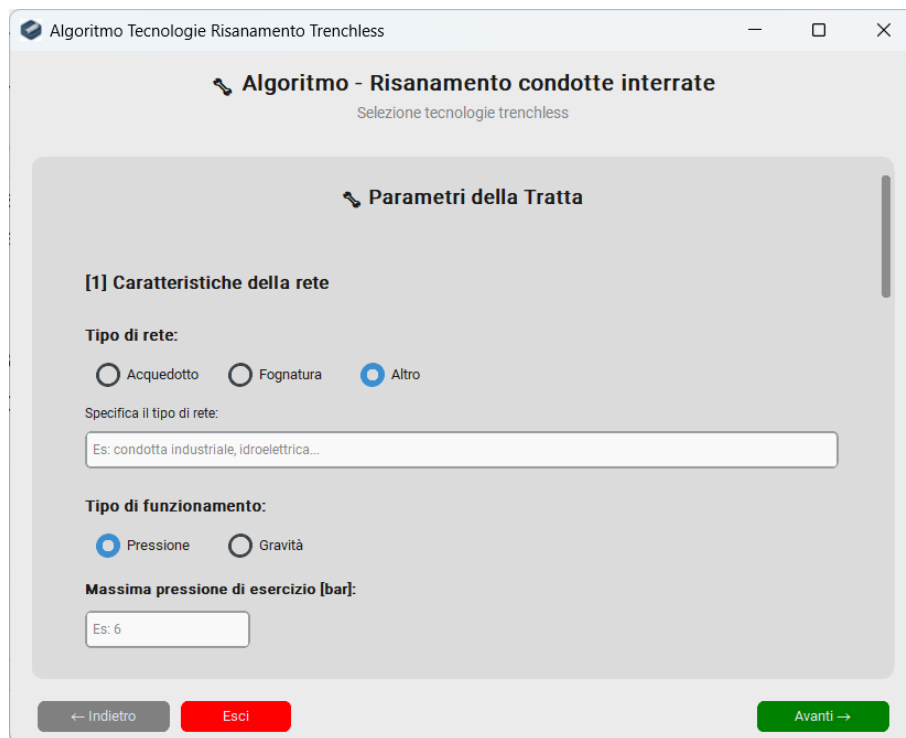


Figura 4.4: Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 1

Le opzioni disponibili per il "Tipo di funzionamento" sono "Pressione" e "Gravità". Se viene selezionato "Pressione" viene abilitato il campo di testo in cui bisogna inserire il valore numerico della "Massima pressione di esercizio", espresso in [bar]: il valore di pressione da considerare è il massimo tra quella di esercizio, incluse sovrappressioni dovute al colpo d'ariete, la pressione di collaudo e il valore minimo di pressione nominale che la nuova tubazione deve garantire in base alle necessità di progetto.

**Seconda sezione** La seconda sezione è dedicata alle caratteristiche della condotta esistente ed è la più corposa. La Figura 4.5 mostra tutti gli input richiesti in questa fase.

Figura 4.5: Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 2

Il primo parametro è la "Forma della sezione trasversale" e viene selezionato da un campo con menù a tendina avente le seguenti opzioni:

- Circolare (è l'opzione predefinita);
- Ovoidale;
- Rettangolare;
- Policentrica;
- Altro: se selezionato, compare un campo di testo per specificare la forma (es. a campana).

Successivamente, l'utente deve inserire le dimensioni della condotta: se la forma della sezione è circolare bisogna inserire il valore di diametro in [mm] nel campo di testo dedicato; per qualsiasi altra forma, invece, il campo del diametro viene sostituito da quelli di larghezza massima e altezza sella sezione, i quali richiedono anch'essi valori in [mm]. Dopodiché, un altro campo con menù a tendina permette di selezionare il "Materiale della condotta" tra le opzioni disponibili, visibili in Figura 4.6.

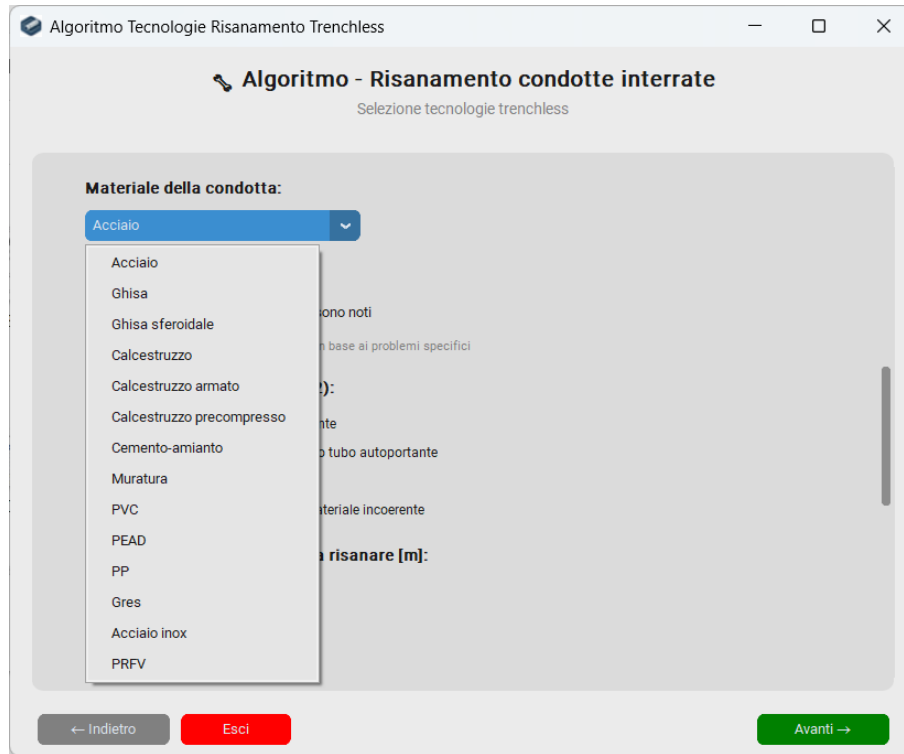


Figura 4.6: Elenco dei materiali disponibili nel programma

A questo punto, è necessario inserire informazioni riguardanti lo stato di deterioramento della condotta esistente. Questa valutazione avviene mediante la selezione di:

- "Difetti rilevati nella condotta";
- "Classe di danno", definita secondo la norma DWA-A 143-2:2015: l'utente deve selezionare la condizione della condotta esistente, da I a III.

Per quanto riguarda i difetti rilevati, l'utente deve innanzitutto scegliere se selezionare l'opzione "I difetti specifici della condotta sono noti"; in caso affermativo, deve poi selezionare almeno uno tra i difetti disponibili per poter procedere. Infine, a titolo informativo, è richiesto l'inserimento della "Lunghezza totale del tratto da risanare", in [m], nell'apposito campo.

**Terza sezione** La terza sezione, visibile in Figura 4.7, riguarda i vincoli operativi e logistici.

Innanzitutto, riguardo la "Possibilità di scavare per eseguire l'intervento" di risanamento, l'utente deve selezionare una delle seguenti tre opzioni:

- Sì: possibilità di scavare per realizzare nuove fosse di accesso;
- No: l'intervento dev'essere eseguito tramite pozzetti esistenti;
- Limitato: la possibilità di scavare è limitata al solo ampliamento di pozzetti esistenti, al fine di adeguarli per l'installazione.

Solo se viene selezionato "No" oppure "Limitato", appare la casella di testo nella quale va inserito il valore in [m] della "Distanza massima tra pozzetti consecutivi". Successivamente, bisogna indicare la presenza o meno di "Allacciamenti e derivazioni laterali": se presenti, va specificata la "Modalità di ripristino degli allacciamenti" richiesta, che può essere:

- dall'esterno (mediante scavi);
- dall'interno della condotta (robotizzato o manuale).

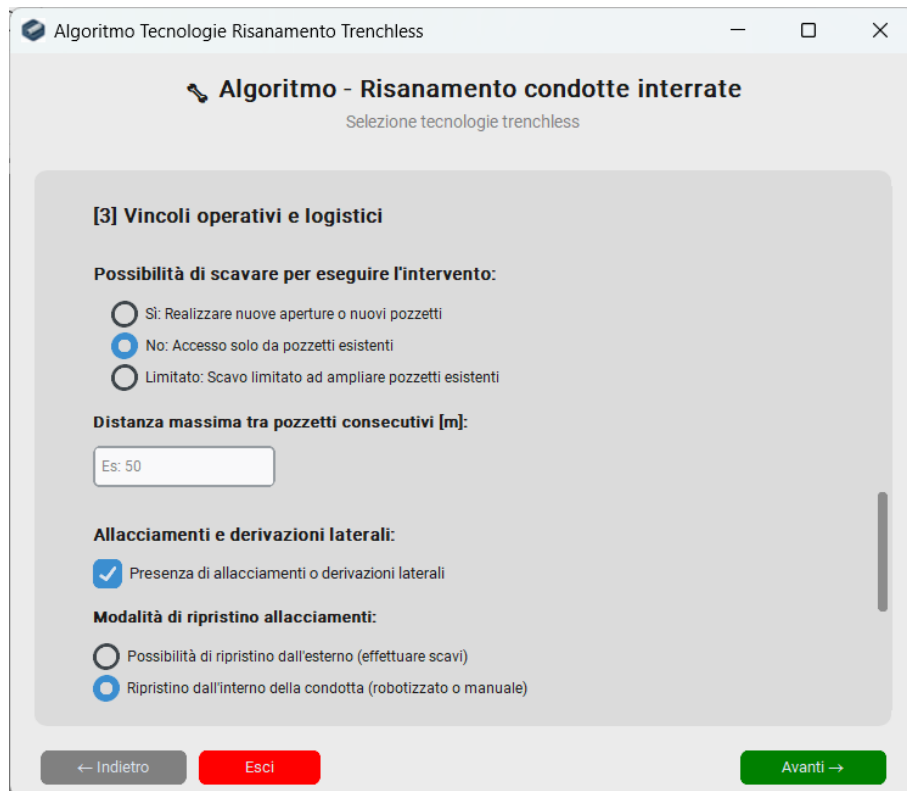


Figura 4.7: Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 3

**Quarta sezione** Infine, l'ultima sezione riguarda concetti di geometria e curvatura; la schermata è mostrata in Figura 4.8.

La prima azione che l'utente deve svolgere è selezionare, o meno, l'opzione "La tratta presenta variazioni di diametro interne". In caso affermativo, nella schermata appaiono dei campi di testo in cui vanno inseriti i valori dimensionali della sezione di dimensione minima e di quella massima presenti nella tratta: in caso di condotta circolare bisogna inserire il diametro minimo e quello massimo, per forme differenti vengono richieste altezza e larghezza relative alle due sezioni.

Inoltre, compaiono le seguenti due domande:

- è possibile effettuare uno scavo localizzato in corrispondenza della variazione?

- è necessario mantenere la variazione di diametro dopo il risanamento?

L'utente può rispondere in maniera affermativa selezionando le due opzioni proposte.

Figura 4.8: Schermata di inserimento dei parametri della tratta: sezione 4

Dopodiché, la possibilità di ridurre l'area della sezione trasversale della condotta è gestita tramite la selezione dell'opzione "È accettabile una riduzione significativa del DN" o dell'opzione opposta.

Infine, l'ultimo parametro in input riguarda la "Curvatura" della condotta. Di default, il programma seleziona l'opzione "Il tratto da risanare è rettilineo"; se l'utente toglie tale selezione, nella schermata appaiono le seguenti opzioni:

- "Le curve sono localizzate in corrispondenza di pozzetti o punti di accesso" ed "È possibile effettuare scavi localizzati in corrispondenza delle curve significative":
  - se almeno una delle due viene selezionata, viene presentata un'ulteriore opzione: "Sono presenti curve ad ampio raggio tra un punto di accesso e l'altro";
- se nessuna delle due opzioni iniziali viene selezionata, oppure se è stata selezionata l'opzione successiva riguardante le curve ad ampio raggio, l'utente deve valutare anche l'opzione "È disponibile il valore del massimo grado di curvatura":

- se viene selezionata, appare un campo di testo in cui si deve "Inserire il valore in gradi (0-90°)";
- altrimenti, si genera un campo con menù a tendina che permette di "Indicare la severità delle curve più significative", scegliendo tra le opzioni disponibili, come mostrato in Figura 4.9.

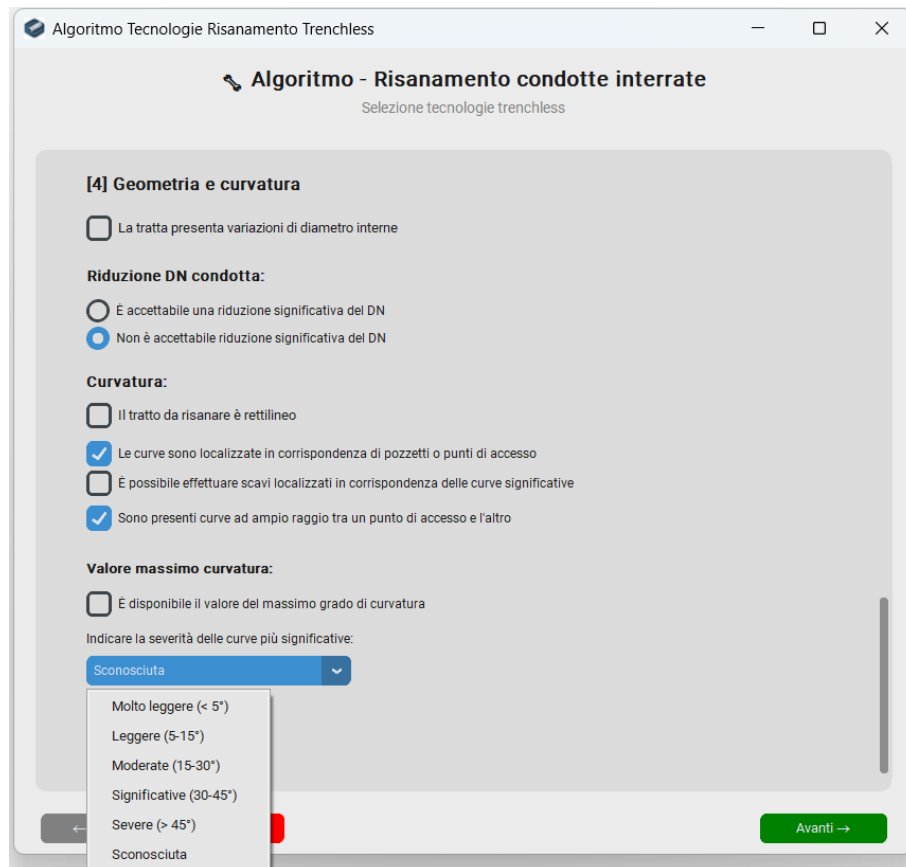


Figura 4.9: Opzioni di severità delle curve disponibili nel programma

La possibilità di inserire la severità delle curve più significative attraverso intervalli prestabiliti, tra cui è presente anche l'opzione di curvatura sconosciuta, rende il sistema flessibile ed adeguato alle situazioni reali, in cui è spesso difficile conoscere l'effettivo grado di curvatura massimo delle reti.

Come per la schermata di avvio del programma, anche per quella di inserimento dei parametri tecnici il pulsante "Avanti →" porta l'utente alla schermata successiva solo se sono state inserite correttamente tutte le informazioni richieste.

La schermata successiva, in Figura 4.10, mostra i risultati del processo di selezione, ossia l'elenco delle tecnologie tecnicamente compatibili con la tratta in esame, in base ai dati inseriti nella schermata precedente.

L'utente ha quindi la possibilità di visualizzare l'elenco delle tecnologie valide in una tabella che riporta anche l'intervallo di diametri risanabili e l'elenco delle classi statiche del *liner* disponibili (N/D per le riparazioni

puntuali). Nel caso in cui non vengano selezionate tecnologie compatibili sulla base dei parametri inseriti, la schermata mostrerà un riquadro rosso contenente il messaggio "Nessuna tecnologia compatibile trovata".



Figura 4.10: Schermata dei risultati forniti dal programma

A questo punto, se nel progetto è presente più di una tratta, viene visualizzato un pulsante (es. "Tratta 2 →") che permette all'utente di passare alla schermata dedicata all'inserimento dei parametri tecnici della tratta successiva.

Una volta completato l'inserimento degli input dell'ultima tratta del progetto, nella schermata dei risultati è presente il pulsante "Genera PDF" in basso a destra, il quale permette di creare automaticamente il file PDF contenente il report relativo all'intero progetto esaminato. Se l'utente preme tale pulsante, si apre una finestra che conferma che il PDF è stato generato con successo: tale finestra, in Figura 4.11, riporta anche il nome del file e la cartella in cui è stato salvato.

La struttura del report viene descritta nella Sezione 4.4.

### 4.3.2 Processo di selezione

Il procedimento di selezione fornisce l'elenco delle tecnologie compatibili grazie al confronto tra i dati in input e le informazioni nel database, secondo determinati criteri di filtraggio che permettono di escludere le tecniche non applicabili. L'algoritmo svolge questo processo in maniera identica per ogni tratta: carica il database, acquisisce gli input inseriti dall'utente e seleziona le tecnologie compatibili in base a criteri prestabiliti.

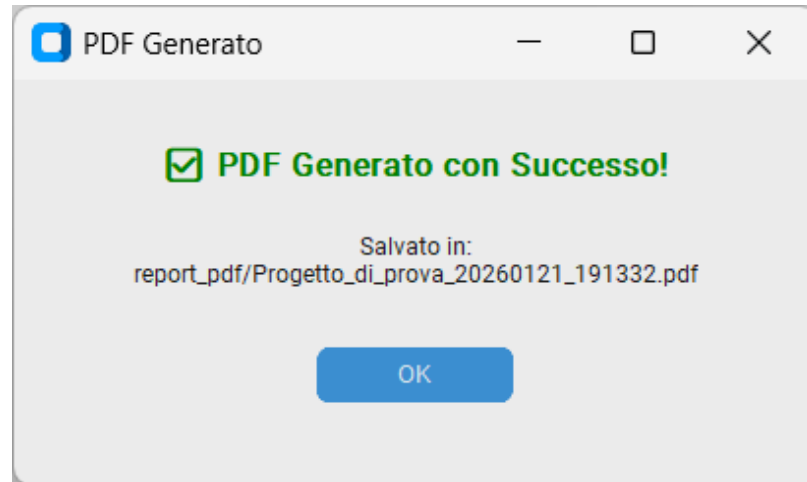


Figura 4.11: Finestra di conferma della generazione del report PDF

Perciò, per progetti con  $n$  tratte, è necessario inserire gli input tecnici  $n$  volte e si ottengono  $n$  elenchi di tecnologie compatibili. In questo modo, per un progetto che presenta tratte di tubazioni con caratteristiche differenti vengono selezionate:

- le tecnologie applicabili per ciascuna singola tratta;
- le tecnologie compatibili con tutte le tratte, ottenute dall'intersezione delle tecniche valide per le singole tratte.

Nella schermata di avvio, il sistema chiede all'utente di specificare se le tratte inserite sono fisicamente consecutive: tuttavia, questa informazione non modifica la logica del processo, poiché l'algoritmo identifica sempre le tecnologie compatibili con tutte le tratte.

Di seguito vengono descritti i diversi criteri impiegati dall'algoritmo nel processo di selezione: ogni criterio si basa sul confronto degli input utente con i parametri tecnici associati alle tecnologie.

Il primo criterio di filtraggio, o di esclusione, riguarda il "Tipo di rete". Per questo parametro viene direttamente verificata la corrispondenza tra input ('Acquedotto', 'Fognatura' o 'Altro') e valori ('Si', 'No') nelle colonne "Acquedotto" e "Fognatura" del database. Nel caso in cui venga selezionata l'opzione "Altro" nessuna tecnologia viene esclusa dall'elenco delle tecniche valide e il testo inserito è utilizzato per rendere completo il report finale. Le tecnologie risultate compatibili vengono considerate dal criterio di filtraggio successivo.

Il parametro "Tipo di funzionamento" è gestito in maniera analoga al precedente, valutando però le colonne "Pressione" e "Gravità".

Il parametro "Materiali risanabili" confronta il materiale della condotta in input con l'elenco dei materiali risanabili da ciascuna tecnologia, presente nel database. Il criterio gestisce le tre tipologie di informazioni presenti nel database in questo modo:

1. "Tutti": la tecnologia è applicabile a qualsiasi materiale;

2. "Tutti\_Tranne ...": compatibilità con tutti i materiali, eccetto quelli elencati;
3. elenco dei materiali compatibili.

Il filtro esclude le tecnologie che non sono in grado di risanare il materiale della condotta esistente.

I filtri per "Difetti della condotta", "Classe di danno" e "Forma della sezione trasversale" sono gestiti in modo simile, ossia verificando la corrispondenza tra i valori in input e informazioni presenti nel database, spesso definite sotto forma di elenchi separati da virgola (ad es. "circolare,ovoidale").

Il filtro per i "Difetti della condotta" considera compatibili le tecnologie in grado di gestire tutti i difetti identificati dall'utente; vengono ritenute applicabili anche le tecnologie adatte a risolvere i difetti presenti in maniera marginale. Il sistema consente di escludere questo criterio dal processo di selezione nel caso in cui l'utente non disponga di informazioni riguardo ai difetti specifici della condotta; in questo modo, è possibile utilizzare il programma in fasi preliminari in cui i difetti non sono noti.

Il criterio riguardante la "Classe di danno" verifica che la classe inserita in input sia presente nell'elenco delle classi compatibili riportato nel database.

Per la "Forma della sezione trasversale", oltre al confronto tra l'input e l'elenco dei profili compatibili, nel database può essere presente l'opzione "Tutte" per le tecnologie che non hanno limitazioni e che quindi non vengono mai escluse a causa di questo criterio.

Successivamente, le tecnologie vengono filtrate in base alle dimensioni della condotta; il sistema richiede che il valore di diametro inserito in input ( $DN_{\text{condotta}}$ ) sia compreso nell'intervallo dei diametri risanabili dalla tecnologia:  $DN_{\text{min}} \leq DN_{\text{condotta}} \leq DN_{\text{max}}$ . In caso di condotte a sezione circolare viene valutato direttamente il diametro inserito; qualora la sezione trasversale abbia una forma diversa, l'algoritmo calcola il diametro equivalente della sezione in modo da confrontarlo con gli estremi dell'intervallo di diametri risanabili. Il diametro equivalente si ottiene, a partire dai valori di larghezza massima  $L$  e di altezza  $H$  inseriti, tramite i seguenti passaggi:

1. calcolare l'area  $A$  della sezione trasversale, in base alla forma:
  - (a) rettangolare:  $A = L \cdot H$ ;
  - (b) ovoidale:  $A = 0.765 \cdot L \cdot H$ ;
  - (c) altre forme (stima conservativa):  $A = 0.75 \cdot L \cdot H$ ;
2. ottenere il diametro equivalente tramite la formula inversa dell'area del cerchio:  $DN_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ .

La formula impiegata per calcolare l'area della sezione ovoidale è stata stimata a partire dai valori ( $A$ ,  $L$ ,  $H$ ) riportati in tabelle di fornitori di tubi ovoidali: il fattore 0.765 è stato calcolato come  $\frac{A}{L \cdot H}$ .

Se nella tratta in analisi è presente una variazione dimensionale, in input vengono inserite le dimensioni della sezione minima ( $DN_{\min}$  o  $L_{\min}; H_{\min}$ ) e massima: il sistema esegue la valutazione di compatibilità dimensionale sia per il diametro minimo che per quello massimo, garantendo che la tecnologia possa risanare l'intero intervallo dimensionale presente. Vengono verificate le seguenti relazioni:  $DN_{\min} \leq DN_{\text{sez\_minima}}$  e  $DN_{\max} \geq DN_{\text{sez\_massima}}$ .

La presenza di "Variazioni dimensionali" comporta un ulteriore filtraggio delle tecnologie. Dopo aver inserito le dimensioni minime e massime del tratto da risanare, all'utente viene chiesto se è possibile effettuare uno scavo localizzato in corrispondenza della variazione dimensionale. In caso affermativo, uno scavo intermedio permetterebbe di eseguire l'intervento su due sotto-tratte a DN costante; di conseguenza, questo criterio fornisce:

- l'elenco delle tecnologie che sono in grado di risanare l'intera tratta, senza dover ricorrere all'apertura di uno scavo per gestire la variazione dimensionale;
- gli elenchi delle ulteriori tecnologie compatibili, rispettivamente, con la sotto-tratta  $DN_{\min}$  e con la sotto-tratta  $DN_{\max}$ .

Pertanto, nel caso di una tratta in cui ci sia una variazione dimensionale e la possibilità di effettuare uno scavo intermedio, l'algoritmo non fornirà un singolo elenco per l'intera tratta; bensì, l'output presenterà i tre elenchi separati.

Invece, se non è possibile scavare, vengono escluse le tecnologie che richiedono che la condotta esistente abbia un diametro costante e l'output conterrà un unico elenco.

Dopodiché, l'utente deve indicare la volontà, o meno, di mantenere la variazione di diametro dopo il risanamento; se tale variazione è richiesta, vengono escluse le tecnologie che non permettono di ottenere una nuova tubazione con salto dimensionale.

Per quanto riguarda i "Requisiti di scavo", la logica del filtro è la seguente:

- se la tecnologia non richiede scavo, o se la necessità di scavo dipende fortemente dalle condizioni di progetto, è considerata sempre compatibile;
- se la tecnologia necessita di scavare viene esclusa quando l'utente richiede che l'esecuzione dell'intervento avvenga tramite pozzetti esistenti;
- se la tecnologia richiede scavo solo per diametri superiori a una determinata soglia (indicata come  $DN^*$ ) viene esclusa solo se l'utente ha inserito il divieto di scavare e se il diametro della condotta è superiore alla soglia.

Se l'utente ha selezionato la possibilità di scavare per realizzare nuove fosse di accesso, il criterio sul "Lancio massimo" non viene applicato: l'apertura di nuovi scavi permette di ridurre la lunghezza di installazione che

dev'essere risanata in un singolo inserimento, consentendo di adeguarla ai limiti della tecnologia selezionata. Invece, in caso di intervento consentito solamente tramite pozzetti esistenti (eventualmente ampliati per permettere l'installazione) la massima lunghezza tra pozzetti consecutivi è un vincolo: il criterio esclude le tecnologie il cui valore di lancio massimo è minore della massima distanza tra pozzetti consecutivi. Per le riparazioni puntuali questo criterio non viene applicato, poiché queste non sono intrinsecamente caratterizzate da una massima lunghezza di installazione. Tuttavia, per la tecnologia "Iniezioni con robot" bisogna verificare l'applicabilità in base alla lunghezza del cavo del sistema robotizzato.

Per le tratte in cui sono presenti "Allacciamenti laterali" e non è possibile realizzare scavi per la loro riconnessione alla condotta principale, le tecnologie vengono filtrate in base alla modalità di ripristino degli allacciamenti: a seconda del funzionamento della rete (in pressione o a pelo libero) vengono escluse le tecnologie che richiedono scavi per connettere gli allacciamenti laterali.

Per quanto riguarda la "Riduzione del DN della condotta", vengono confrontati i requisiti di progetto riguardo alla possibilità, o meno, di ridurre l'area della sezione trasversale con le caratteristiche delle tecnologie. Nel caso in cui tale riduzione è ammissibile non viene esclusa nessuna tecnologia; altrimenti, vengono eliminate le tecniche che comportano la formazione di un'intercapedine tra nuovo e vecchio tubo.

In base alla tipologia di rete e al valore di diametro della condotta, l'algoritmo individua nel database il massimo valore di "Pressione" supportato dalla tecnologia  $PN_{\max} = f(\text{rete}, \text{DN})$ : nel caso in cui la rete sia "Altro", il massimo valore di pressione viene selezionato indipendentemente dalla tipologia di rete. Va verificato che il valore di pressione nominale supportato dalla tecnologia sia maggiore o uguale del valore massimo della pressione di esercizio:  $PN_{\max} \geq P_{\text{esmax}}$ . Per condotte con variazioni dimensionali, tale verifica viene eseguita per i valori di pressione associati sia al diametro minimo che a quello massimo. Le tecnologie che non soddisfano questo requisito vengono escluse.

Il filtraggio secondo il criterio di "Curvatura" avviene in base al tipo di funzionamento della rete e al diametro della tubazione. L'algoritmo individua il massimo angolo di curvatura supportato dalla tecnologia e lo confronta con il valore in input, mantenendo le tecnologie con un valore di angolo maggiore rispetto a quello massimo presente nella tratta:  $\theta_{\text{tecmax}} \geq \theta_{\text{tratta,max}}$ . Questo criterio non viene applicato nei seguenti casi:

- il tratto da risanare è rettilineo;
- il massimo angolo di curvatura del progetto è sconosciuto;
- le curve sono localizzate in pozzetti oppure si possono effettuare scavi localizzati in corrispondenza delle curve: di conseguenza, è possibile dividere l'intervento in tratti rettilinei.

Una volta completata la valutazione per mezzo di tutti i criteri descritti, l'output è pronto per essere generato.

## 4.4 Report PDF

Il sistema sviluppato include la funzionalità di generazione automatica di un file PDF contenente il report relativo al progetto esaminato; questo file viene salvato nella cartella "report\_PDF", anch'essa creata automaticamente, qualora non sia già esistente, nella stessa posizione dell'applicazione *.exe*. Il file viene nominato con il nome del progetto inserito dall'utente seguito dalla data e dall'orario in cui è stato generato, nel seguente formato: *NomeProgetto\_aaaammgg\_hhmmss.pdf*.

Il report è così strutturato:

- riquadro contenente le informazioni generali del progetto;
- per ciascuna tratta:
  - tabella di riepilogo dei parametri di input;
  - tabella/e delle tecnologie compatibili;
  - note tecniche;
- per progetti con più tratte: elenco delle tecnologie compatibili con tutte le tratte;
- riquadro con avvertenza finale.

La Figura 4.12 mostra la parte superiore del report, contenente le informazioni generali del progetto in esame e la tabella di riepilogo dei parametri tecnici della prima tratta; questa tabella permette all'utente di verificare il corretto inserimento dei dati in input.

Successivamente, come illustrato in Figura 4.13, viene riportato l'elenco delle tecnologie compatibili in base agli input riportati nel riepilogo soprastante; per ogni tecnologia, la tabella indica anche l'intervallo di diametri risanabili, le classi statiche disponibili e se si tratta di riparazione puntuale oppure no. Qualora nessuna tecnologia sia compatibile con i parametri della tratta, al posto della tabella viene visualizzato un riquadro a sfondo rosso contenente la scritta "Nessuna tecnologia compatibile trovata".

Per le tratte contenenti una variazione dimensionale e in cui è possibile effettuare uno scavo intermedio, al posto dell'unica tabella delle tecnologie compatibili l'output presenta due sotto-sezioni, come mostrato in Figura 4.14:

- intervento unico su tutta la tratta: riporta la tabella contenente le tecnologie applicabili senza la necessità di dover eseguire uno scavo intermedio;
- interventi separati, effettuando uno scavo in corrispondenza della variazione di diametro. Vengono riportati gli elenchi delle ulteriori tecnologie compatibili:
  - con la sotto-tratta  $DN_{\min}$ ;

– con la sotto-tratta  $DN_{max}$ .

## REPORT ANALISI COMPATIBILITA

Algoritmo per la selezione di Tecnologie di Risanamento Trenchless

<b>Nome progetto:</b>	Progetto di prova
<b>Data analisi:</b>	02/03/2026 alle ore 17:28
<b>Numero tratte:</b>	2
<b>Utente:</b>	FM
<b>Configurazione:</b>	Tratte consecutive

### Tratta 1

#### Parametri di progetto

<b>Tipo di rete</b>	Acquedotto
<b>Funzionamento</b>	Pressione
<b>Forma sezione trasversale</b>	Circolare
<b>Diametro [mm]</b>	1200
<b>Materiale condotta</b>	Acciaio
<b>Problemi condotta rilevati</b>	Infiltrazioni/esfiltrazioni
<b>Classe di danno</b>	3
<b>Lunghezza totale [m]</b>	500.0
<b>Accesso condotta</b>	Nuove aperture o nuovi pozzetti
<b>Allacciamenti e derivazioni laterali</b>	Presenti (Possibilità di scavo per il ripristino)
<b>Riduzione DN accettabile</b>	No
<b>Curvatura massima [°]</b>	Sconosciuta
<b>Pressione di esercizio [bar]</b>	4.0

Figura 4.12: Report: info generali e riepilogo parametri prima tratta

#### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 5 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (in pressione)	150-1200	A,B	No
2	Close-fit - Costrizione radiale	100-1500	A,B	No
3	Pipe bursting (Berstlining)	50-1200	A	No
4	Risanamento manuale *	800-10000	N/D	Si
* Nota: Verificare la massima pressione di esercizio supportata per questo diametro con il fornitore della tecnologia.				
5	Manicotti interni *	150-6000	N/D	Si
* Nota: Riparazione puntuale - Non ripristina structuralità completa.				

Figura 4.13: Report: elenco delle tecnologie compatibili

Il report include diverse note tecniche che vengono visualizzate in situazioni in cui non è semplice definire in modo univoco l'applicabilità di alcune tecnologie. La scelta di inserire delle note tecniche rende il sistema più flessibile. Pertanto, è stato adottato un approccio che, piuttosto che escludere dall'elenco dei risultati alcune alternative potenzialmente valide,

mantiene tali tecnologie evidenziando esplicitamente gli aspetti da verificare con attenzione.

#### Tecnologie per intervento unico su tutta la tratta

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 2 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No

#### Tecnologie per interventi separati

Effettuando uno scavo in corrispondenza della variazione di diametro, è possibile eseguire interventi separati con le seguenti tecnologie (oltre a quelle per intervento unico):

##### Sotto-tratta DN-min (600 mm)

1 tecnologie aggiuntive compatibili:

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe St.	Puntuale
1	Manicotti interni	150-6000	N/D	Si

##### Sotto-tratta DN-max (800 mm)

2 tecnologie aggiuntive compatibili:

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe St.	Puntuale
1	Risanamento manuale	800-10000	N/D	Si
2	Manicotti interni	150-6000	N/D	Si

Figura 4.14: Report per tratte con variazione dimensionale e scavo intermedio

Alcune note semplici, riferite a specifiche tecnologie presenti nell'elenco di quelle compatibili, vengono stampate direttamente nella tabella in righe appositamente aggiunte al di sotto della relativa tecnologia. Queste note, visibili in righe a sfondo giallo nella Figura 4.13, riguardano:

- alcune riparazioni puntuali;
- le tecnologie adatte a risolvere difetti in maniera marginale;
- le tecnologie per cui la massima pressione di esercizio supportata per le condizioni di progetto non è nota.

Per quanto riguarda le riparazioni puntuali, vengono visualizzate le seguenti note solamente quando la classe di danno della condotta è II o III e le rispettive tecnologie risultano compatibili con la tratta in esame:

- *Iniezioni con robot*: in condotte in classe danno elevata può essere impiegata come tecnologia preparatoria, senza ripristinare la strutturabilità;
- *Manicotti interni*: è una riparazione puntuale, non ripristina completamente la strutturabilità della condotta.

Queste note indicano che le due tecnologie sono impiegabili anche in condotte completamente deteriorate ma che, tuttavia, non sono in grado di compiere un risanamento completamente strutturale; pertanto, sono utilizzabili per compiere lavori di preparazione della condotta o in associazione ad altre tecnologie.

Qualora la condotta presenti dei difetti che alcune delle tecnologie compatibili sono in grado di risolvere solamente in maniera marginale, viene visualizzata una nota che invita l'utente a verificare le condizioni di applicabilità della tecnologia per lo specifico difetto.

Per alcune tecnologie presenti nel database, le informazioni riguardo alla massima pressione di esercizio supportata non sono disponibili, oppure tali informazioni non coprono l'intero intervallo dei diametri risanabili. Pertanto, la nota segnala la necessità di verificare l'effettiva compatibilità presso il fornitore della tecnologia in questione.

Ulteriori annotazioni, invece, sono di carattere generale (non sono relative ad una singola tecnologia), oppure presentano un testo più approfondito; pertanto, vengono stampate nella sezione "Note tecniche" appositamente dedicata, come illustrato nel report riportato in Figura 4.15.

#### Note tecniche

##### [!] **Curvatura non specificata**

Non è stato specificato l'angolo di curvatura massimo presente nella condotta. Il sistema non ha escluso tecnologie in base a questo criterio. Si raccomanda di verificare la compatibilità delle tecnologie selezionate con le curvature effettivamente presenti in fase di progettazione dell'intervento.

##### [!] **Forma sezione personalizzata**

Verificare l'effettiva compatibilità delle tecnologie selezionate con condotte di forma 'a campana'.

##### [!] **Lancio massimo**

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

##### [!] **Verifica accesso senza scavo**

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità), Discrete pipes (relining PRFV), Cement Mortar Lining (CML). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

Figura 4.15: Report: note tecniche

Di seguito sono elencati gli aspetti a cui sono riferite tali note tecniche, illustrando le situazioni in cui vengono visualizzate:

- *Curvatura sconosciuta*: se l'utente non specifica il massimo grado di curvatura, nessuna tecnologia viene esclusa: pertanto, è necessario verificare la compatibilità tra le tecnologie selezionate e le curve presenti nella tratta;
- *Forma della sezione trasversale personalizzata*: se l'utente inserisce una forma non presente tra le opzioni disponibili, bisogna verificare l'effettiva applicabilità delle tecnologie selezionate;
- *Variazione dimensionale*: per le tecnologie in grado di gestire variazioni dimensionali, deve essere accertata la fattibilità del risanamento in base all'entità della variazione presente;

- *Lancio massimo*: come anticipato nel Paragrafo 4.2.2, il valore del lancio massimo dipende da diversi fattori. Pertanto, in progetti in cui non è possibile realizzare nuove fosse di accesso, viene raccomandata la verifica della lunghezza realmente risanabile in un unico intervento in base alle specifiche condizioni del sito;
- *Necessità di scavo per installazione*: qualora non sia possibile effettuare alcun tipo di scavo, per alcune tecnologie è necessario verificare che il diametro della condotta e le dimensioni dei pozzetti esistenti ne consentano l'installazione.

Per i progetti che comprendono più tratte, il report presenta una sezione dedicata all'elenco delle tecnologie compatibili in comune con tutte le sezioni; qualora nessuna tecnologia soddisfi i requisiti di tutte le tratte, il sistema lo segnala, indicando la necessità di utilizzare tecnologie diverse per i diversi segmenti.

Infine, ogni report include un'avvertenza conclusiva, la quale chiarisce che il sistema sviluppato ha lo scopo di fornire un supporto decisionale preliminare e che la decisione finale della tecnologia da utilizzare spetta a un professionista qualificato.

La Figura 4.16 illustra la sezione finale del report, che include l'elenco delle tecnologie comuni e l'avvertenza conclusiva.

Algoritmo Tecnologie Risanamento Trenchless
Progetto: Progetto di prova

---

**Tecnologie compatibili con tutte le tratte**

---

Le seguenti 3 tecnologie sono compatibili con tutte le 2 tratte:

1. **CIPP UV (in pressione)**
2. **Close-fit - Costrizione radiale**
3. **Pipe bursting (Berstlining)**

**AVVERTENZA**

I risultati sono generati da un processo di selezione automatico basato sui dati forniti dall'utente e sul database tecnico e sono finalizzati a fornire supporto decisionale preliminare.

Solo professionisti qualificati con adeguata conoscenza delle tecnologie di risanamento trenchless sono in grado di valutare l'accuratezza dei dati inseriti, la plausibilità dei risultati e la loro applicabilità al caso specifico.

La decisione dell'effettiva tecnologia da adottare e la relativa progettazione sono step successivi che richiedono ulteriori approfondimenti da parte del progettista.

Figura 4.16: Report: sezione finale

# Capitolo 5

## Validazione del sistema

### 5.1 Modalità del processo di validazione

Un DSS automatico necessita di essere ampiamente validato attraverso progetti di interventi di risanamento reali [13]. La validazione permette di valutare la qualità e l'affidabilità dei risultati del processo di selezione delle tecnologie di risanamento.

Il lavoro di validazione del sistema sviluppato è stato svolto utilizzando 60 casi progettuali di interventi di risanamento effettivamente realizzati. La modalità di validazione è la seguente: per ciascun caso viene eseguito il confronto tra le risultanze dell'algoritmo, ottenute inserendo i parametri tecnici di progetto, e le effettive tecnologie individuate ed utilizzate in fase esecutiva.

La valutazione di cinque casi progettuali esemplificativi è riportata nella Sezione 5.2.

Per poter testare i vari casi, nell'algoritmo è stata implementata una funzionalità aggiuntiva; si tratta di una funzione che non modifica la logica di selezione, ma che permette di confrontare i risultati del sistema con quelli di progetti reali già completati. L'utente inserisce, oltre agli input tecnici, le tecnologie realmente utilizzate nel progetto in esame; il sistema, dopo aver eseguito il normale processo di filtraggio, confronta le tecnologie utilizzate con quelle selezionate dall'algoritmo e, nel caso in cui una tecnologia utilizzata non compaia nell'elenco delle tecnologie compatibili, mostra i motivi di tale esclusione. Pertanto, nel caso in cui le risultanze si discostino dai risultati attesi, questa funzione permette di individuare eventuali limitazioni nel database o nei criteri di selezione.

Attualmente, tale funzionalità non è stata integrata nell'applicazione *stand-alone* poiché non rientra nella finalità principale del programma, ossia l'identificazione delle tecnologie compatibili per nuovi progetti. Pertanto, durante la fase di validazione del sistema, questa funzione è stata utilizzata eseguendo l'algoritmo da riga di comando in ambiente Python.

Tuttavia, l'integrazione di questa funzionalità nell'applicazione consentirebbe all'utente di valutare la compatibilità di una tecnologia specifica e di

visualizzare i motivi di un'eventuale esclusione; tale estensione rappresenta un possibile sviluppo futuro volto a rendere il sistema più completo.

L'analisi generale dei risultati ottenuti dal confronto tra casi reali e output dell'algoritmo è illustrata nella Sezione 5.3; tale valutazione permette di stabilire l'efficacia e l'affidabilità del sistema sviluppato.

## 5.2 Casi progettuali

I casi progettuali utilizzati per validare l'algoritmo sono stati selezionati con lo scopo di testare scenari il più differenziati possibili.

Per la maggior parte dei casi utilizzati, i parametri necessari sono stati ottenuti tramite l'analisi di documenti tecnici appartenenti ai progetti (definitivi o esecutivi) degli interventi di risanamento in questione. Solo per tre casi studio le informazioni provengono da presentazioni diffuse dai fornitori della tecnologia impiegata nell'intervento; questa scelta è motivata dalla mancanza di disponibilità di progetti in cui sono state utilizzate le tecnologie *TIP-method* e *spiral wound lining*.

Complessivamente, sono stati testati 60 casi studio aventi svariate caratteristiche:

- tubazioni di acquedotto, fognatura e di impianti idroelettrici;
- casi a singola tratta o multi-tratta (fino a 5 tratte);
- diverse condizioni della condotta esistente (classe di danno da I a III);
- condotte di varie forme e materiali;
- differenti requisiti di scavo;
- presenza di variazioni dimensionali;
- valori di diametro compresi tra DN=125 [mm] e DN=3000 [mm];
- pressione di esercizio tra 1 [bar] e 30 [bar];
- tratte rettilinee e tratte con curvatura, talvolta sconosciuta;
- utilizzo di tutte le tecnologie appartenenti al database, tranne il *cement mortar lining*

Tuttavia, nessuno degli interventi analizzati include lo scenario in cui, per il risanamento di una condotta con variazione di diametro interna a una tratta, fosse possibile realizzare uno scavo intermedio localizzato in corrispondenza della transizione dimensionale. Pertanto, nonostante la logica per tale scenario sia stata implementata nel sistema, la sua accuratezza non è stata validata durante questo lavoro.

Per determinati casi studio in cui non è stato possibile stabilire in maniera univoca alcuni parametri in input, sono state adottate le seguenti semplificazioni:

- la possibilità di ridurre l'area della sezione trasversale della condotta è stata stabilita in base alla tipologia di installazione (aderente o meno) della tecnologia utilizzata:
  - *loose-fit* → è accettabile una riduzione significativa del DN;
  - *close-fit* → non è accettabile una riduzione significativa del DN;
- qualora non sia nota la massima pressione di esercizio (o la pressione di collaudo), in input viene inserito il valore della pressione nominale (PN) della nuova tubazione;
- le connessioni laterali sono state considerate assenti nei casi in cui non vengono esplicitamente menzionate nei documenti di progetto;
- nei casi in cui i difetti specifici della condotta e il massimo grado di curvatura non sono noti, vengono inseriti come sconosciuti;
- la classe di danno della condotta, se non specificata nei documenti di progetto, è stata dedotta dalla descrizione delle condizioni della tubazione da risanare o dalla condizione adottata per svolgere il calcolo statico.

Di seguito sono illustrati cinque casi progettuali significativi.

### 5.2.1 Caso A - Impianto idroelettrico in Val Venosta

Il primo caso progettuale presentato riguarda il *relining* di un tratto della galleria di derivazione principale di un impianto di produzione idroelettrica ubicato in Val Venosta (BZ). I lavori hanno avuto inizio il 2 dicembre 2021 e sono terminati il 4 aprile 2022.

La Figura 5.1 mostra il tratto interessato dagli interventi; tale segmento è rettilineo e ha una lunghezza pari a circa 1000 m.

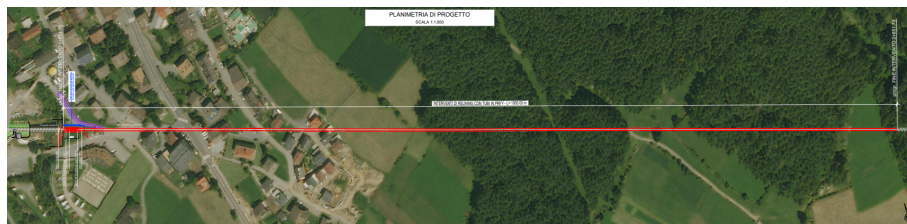


Figura 5.1: Caso A - Impianto idroelettrico in Val Venosta: planimetria di progetto

La galleria in pressione è rivestita con calcestruzzo armato a sezione circolare con diametro interno pari a 3.00 m (3000 mm). Il progetto ha l'obiettivo di ripristinare la funzionalità idraulica della galleria, impermeabilizzandola e annullando le perdite idrauliche esistenti; in base ai risultati delle ispezioni svolte, si specifica che non si sono manifestate fratture o danneggiamenti al rivestimento tali da ipotizzare comportamenti anomali della

galleria dal punto di vista strutturale. Tuttavia, è stata adottata una soluzione che consente di realizzare un rinforzo strutturale, garantendo così un miglioramento complessivo dell'opera.

L'intervento consiste nel *relining* interno della galleria, mediante la posa di una nuova tubazione in P.R.F.V. avente diametro nominale di 2700 mm e diametro interno di 2656 mm; è stata realizzata anche l'iniezione dell'intercapedine tra nuova tubazione e galleria esistente con specifica malta a ritiro compensato. Pertanto, la tecnologia utilizzata è *discrete pipes lining* con tubi in P.R.F.V.. Nonostante la galleria, nel tratto interessato, presenti un carico idraulico massimo interno pari a circa 4.5 bar, viene specificato che le nuove tubazioni dovranno possedere classe di pressione nominale  $PN \geq 6$  bar.

La scelta di un intervento *loose-fit* implica la possibilità di ridurre il diametro interno della galleria; le tubazioni individuate, pur diminuendo l'area della sezione trasversale, non incrementano significativamente le perdite di carico grazie alla contemporanea riduzione della scabrezza delle superfici interne. Per poter eseguire l'intervento, è stata realizzata un'apertura nella galleria esistente, consentendo l'accesso all'interno della stessa con adeguati mezzi e l'inserimento delle nuove virole. Nei documenti di progetto non viene mai menzionata la presenza di allacciamenti o derivazioni laterali.

La Figura 5.2 illustra il riepilogo dei parametri di progetto e l'elenco delle tecnologie compatibili; l'intero report generato dal sistema è riportato nell'Allegato A.

Il sistema ha individuato tre tecnologie compatibili in base ai dati di progetto: tra di esse è presente la soluzione progettuale realmente impiegata, ossia *Discrete pipes (relining P.R.F.V.)*. Le altre due tecnologie selezionate dall'algoritmo presentano delle note specifiche: infatti, per il risanamento manuale non è nota la massima pressione di esercizio che può essere sopportata, perciò si invita l'utente a verificare l'effettiva compatibilità; i manicotti interni, invece, appartengono alla categorie delle riparazioni puntuali e non sono in grado di eseguire completamente il risanamento.

Di seguito vengono riassunte le considerazioni relative all'intervento di risanamento della galleria di derivazione:

- progetto mono-tratta;
- 1 tecnologia utilizzata: *Discrete pipes (relining P.R.F.V.)*;
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo;
- 3 tecnologie compatibili selezionate, di cui 2 con specifica nota.

Queste tipologie di informazioni vengono raccolte per ciascun caso progettuale testato e sono necessarie per analizzare globalmente l'accuratezza dell'algoritmo.

Per il caso esaminato, le risultanze dell'algoritmo sono congruenti con le soluzioni realmente adottate; sono stati valutati correttamente:

- 1 caso progettuale su 1;

- 1 tratta su 1;
- 1 tecnologia utilizzata su 1.

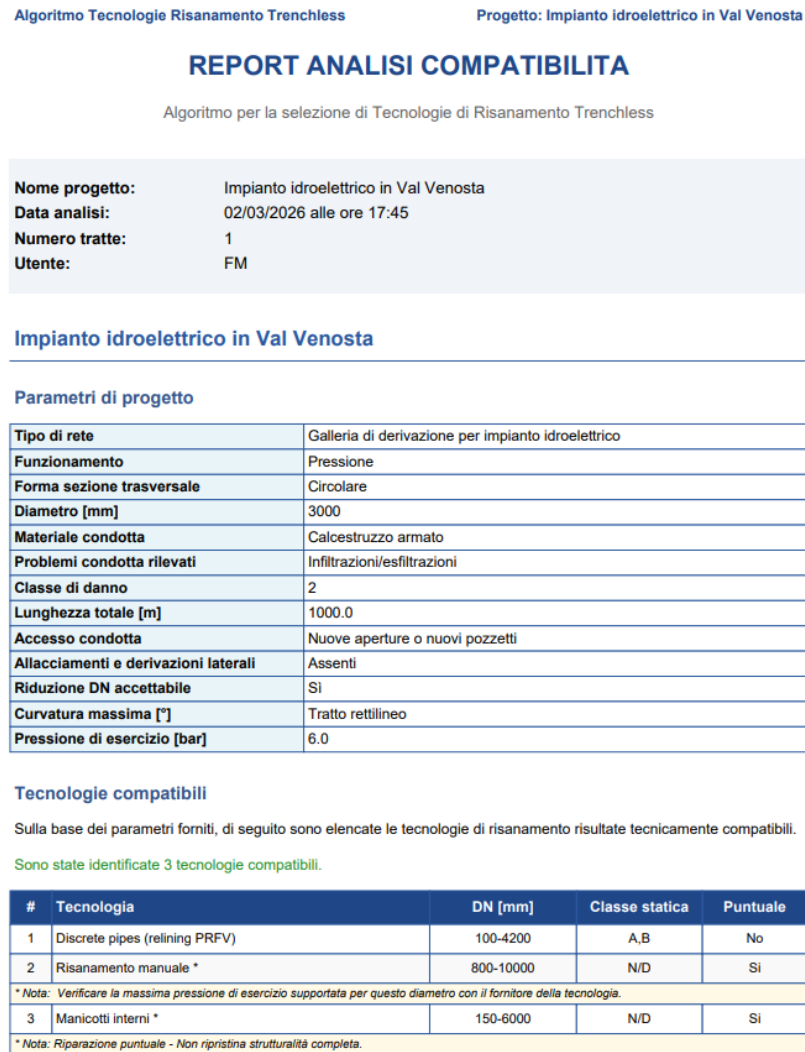


Figura 5.2: Caso A - Impianto idroelettrico in Val Venosta: report generato dall'algoritmo

### 5.2.2 Caso B - Limena, Via Del Santo

Il secondo caso considerato è il progetto di risanamento di una condotta fognaria in gestione a ETRA S.p.A. situata nel comune di Limena (PD) in Via Del Santo. L'intervento ha avuto luogo tra il 24 giugno e il 14 settembre 2024, per un totale di 84 giorni naturali consecutivi.

La condotta circolare in cemento-amianto ha uno sviluppo complessivo di circa 1200 m, illustrato in Figura 5.3, e si divide in due tratte consecutive:

1. DN350 e lunghezza 745 m;



del progetto esecutivo. Gli allacciamenti laterali sono presenti e vengono riaperti dall'interno con frese robotizzate [26].

Il percorso della condotta fognaria non è rettilineo: nella tratta DN350 la massima curvatura è di entità lieve ( $5-15^\circ$ ), mentre in quella DN300 tutte le curve presenti sono localizzate in corrispondenza di pozzetti esistenti. La Figura 5.4 illustra una parte della tratta con DN300 in cui è evidente la presenza di curve severe localizzate in corrispondenza di cernere; pertanto, il risanamento può essere svolto nei tratti rettilinei tra un pozzetto e l'altro.

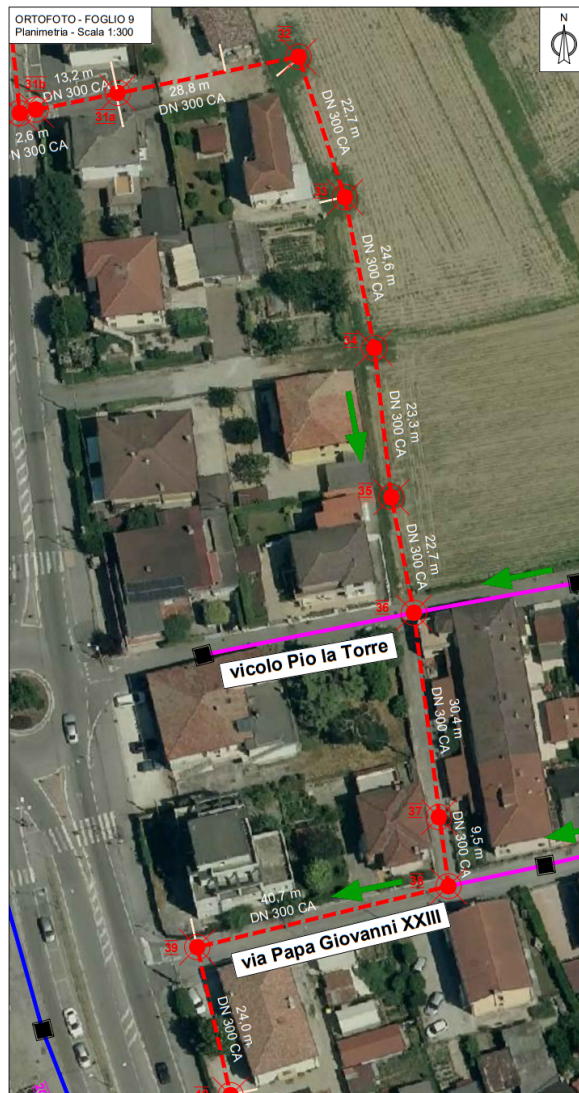


Figura 5.4: Caso B - Limena: curve localizzate nei pozzetti [25]

Le due tratte presentano caratteristiche molto simili tra loro; le differenze sono:

- diametro: DN350 e DN300;
- lunghezza totale della tratta: 745 m e 432 m;

- distanza massima tra pozzetti consecutivi: 38 m e 49 m;
- curvatura massima: lieve (circa 10°) e curve localizzate nei pozzetti.

Il report generato dal sistema, riportato integralmente nell'Allegato B, è illustrato nelle seguenti figure:

- la Figura 5.5 mostra i parametri e i risultati della tratta con DN350;
- la Figura 5.6 mostra parametri, risultati e note tecniche relativi alla tratta avente DN300;
- la Figura 5.7 mostra la sezione che riporta le tecnologie compatibili con tutte le tratte e l'avvertenza finale.

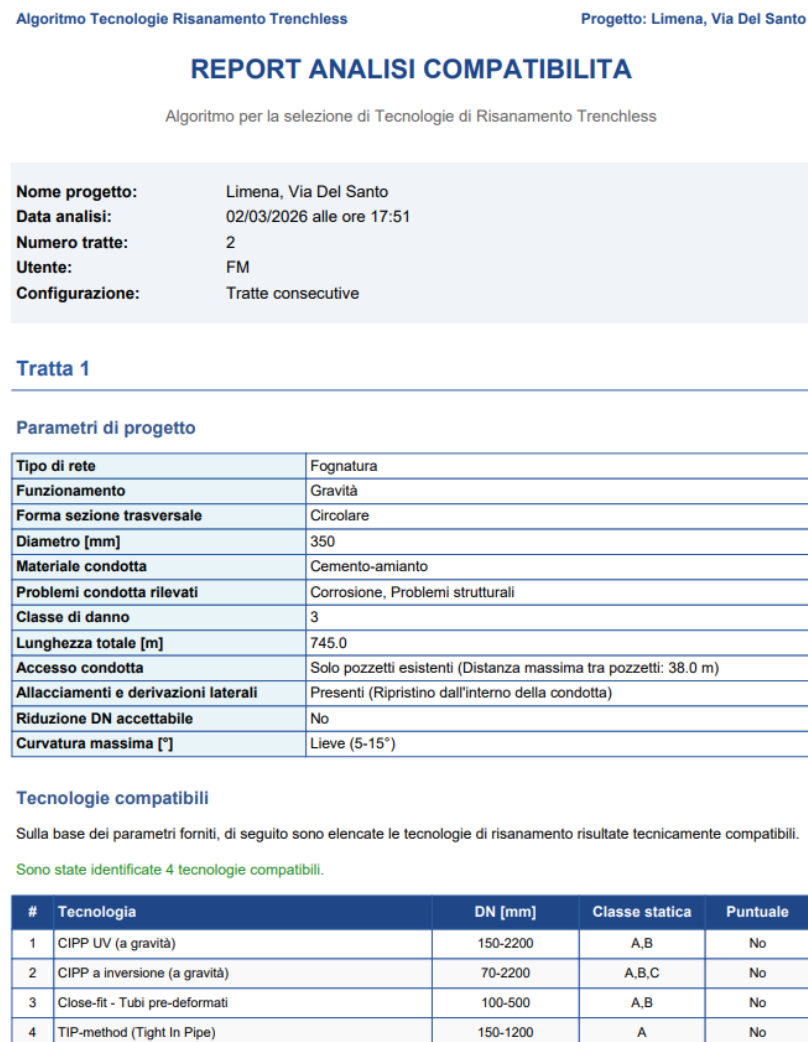


Figura 5.5: Caso B - Limena: report tratta 1

Di seguito vengono riassunti i risultati ottenuti dalla valutazione del progetto di Limena:

1. tratta DN350:

- 1 tecnologia utilizzata: CIPP UV (a gravità);
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo;
- 4 tecnologie compatibili selezionate;

2. tratta DN300:

- 1 tecnologia utilizzata: CIPP UV (a gravità);
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo;
- 6 tecnologie compatibili selezionate, di cui 1 con nota specifica.

Algoritmo Tecnologie Risanamento Trenchless

Progetto: Limena, Via Del Santo

## Tratta 2

### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Circolare
Diametro [mm]	300
Materiale condotta	Cemento-amianto
Problemi condotta rilevati	Corrosione, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	432.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 49.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Curve localizzate in punti di accesso (Tratti rettilinei)

### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 6 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Close-fit - Tubi pre-deformati	100-500	A,B	No
4	Spiral wound lining	150-5500	A,B	No
5	TIP-method (Tight In Pipe)	150-1200	A	No
6	Manicotti interni *	150-6000	N/D	Si

\* Nota: Riparazione puntuale - Non ripristina structuralità completa.

### Note tecniche

#### [i] Lancio massimo

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

#### [i] Verifica accesso senza scavo

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità), Close-fit - Tubi pre-deformati, TIP-method (Tight In Pipe). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

Figura 5.6: Caso B - Limena: report tratta 2

Riassumendo, l'intero caso è stato valutato correttamente dal sistema:

- 1 caso progettuale su 1;



stati aperti diversi scavi per le realizzazione di buche di lancio e di arrivo del *liner*. Nella tratta d'intervento sono stati individuati allacciamenti idrici e derivazioni di rete, i quali sono stati riportati sulla rete di distribuzione DN100 parallela alla rete oggetto di risanamento; alcuni definitivamente, altri invece sono stati riportati sulla rete DN300 a conclusione del risanamento. Queste operazioni hanno richiesto l'apertura di scavi.

Nonostante la pressione di collaudo fosse pari a 7.5 bar, nella relazione tecnico descrittiva di progetto viene specificato che il lavoro, una volta completato, deve garantire pressioni di esercizio fino al PN16 compreso .[23]

La Figura 5.9 mostra parte del report generato dal programma.

#### Rozzano, Viale Isonzo

##### Parametri di progetto

Tipo di rete	Acquedotto
Funzionamento	Pressione
Forma sezione trasversale	Circolare
Diametro [mm]	300
Materiale condotta	Acciaio
Problemi condotta rilevati	Infiltrazioni/esfiltrazioni, Fessure/fori, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	500.0
Accesso condotta	Nuove aperture o nuovi pozzetti
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Possibilità di scavo per il ripristino)
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Tratto rettilineo
Pressione di esercizio [bar]	16.0

##### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 4 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (in pressione)	150-1200	A,B	No
2	CIPP a inversione (in pressione)	100-1400	A,B,C	No
3	Close-fit - Costrizione radiale	100-1500	A,B	No
4	Pipe bursting (Berstlining)	50-1200	A	No

Figura 5.9: Caso C - Rozzano: report

Di seguito vengono elencati i risultati dell'analisi relativa al risanamento della rete idrica di Rozzano:

- progetto mono-tratta;
- 1 tecnologia utilizzata: CIPP a inversione;
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo;
- 4 tecnologie compatibili selezionate.

In conclusione, le risultanze dell'algoritmo sono congruenti con le soluzioni progettuali. Sono stati validati senza errori:

- 1 caso progettuale su 1;
- 1 tratta su 1;
- 1 tecnologia utilizzata su 1.

## 5.2.4 Caso D - Merano, Via dei Portici

Il caso D riguarda il risanamento della rete fognaria nel centro del comune di Merano (BZ). I lavori interessano la zona dei Portici Inferiori e Superiori, nonché Via L. da Vinci, come illustrato in Figura 5.10. Il risanamento è stato svolto dal 2 ottobre 2023 al 6 novembre 2023.



Figura 5.10: Caso D - Merano: planimetria di progetto [14]

Le condotte fognarie da risanare, tutte aventi funzionamento a pelo libero, sono caratterizzate da forme, materiali e dimensioni differenti; pertanto, la valutazione di questo progetto viene separata in 5 tratte consecutive. Per tutte le tratte l'intervento è stato svolto utilizzando la tecnologia CIPP UV; l'installazione è avvenuta attraverso pozzetti esistenti e gli allacciamenti laterali presenti sono stati ripristinati dall'interno.

Nella zona dei Portici Inferiori e Superiori sono state individuate tre tratte, tutte rettilinee e composte da tubazioni in calcestruzzo gettato in opera:

1. da pozzetto SW1 al SW8: condotta ovoidale 600/900 mm, lunghezza 346 m, massima distanza tra pozzetti pari a 57 m;
2. dal SW8 al SW9: condotta ovoidale con variazione dimensionale interna alla tratta (in parte 600/1000 mm e in parte 800/1200 mm), lunghezza 50 m (corrisponde alla massima distanza tra pozzetti);
3. dal SW9 al SW10: condotta con variazione di dimensioni e di forma all'interno della tratta (parte ovoidale 500/750 mm e parte circolare DN500), lunghezza 18 m, allacciamenti laterali assenti.

Il collettore di Via dei Portici era gravemente deteriorato, tanto che per lunghi tratti il calcestruzzo presentava erosioni fino a 10 cm di profondità causate dall'aggressività delle acque reflue; sono state rilevate anche crepe, fori e perdite d'acqua. Pertanto, per le condotte di dimensioni a partire da DN800 e, per profili ovoidali, da 600/900 mm, sono state eseguite operazioni preliminari mediante risanamento manuale, in modo da consentire di installare il *liner* adeguatamente.

La Figura 5.11 mostra il report relativo alla seconda tratta (dal pozzetto SW8 al SW9).

Algoritmo Tecnologie Risanamento Trenchless
Progetto: Merano, Via dei Portici

### Tratta 2

---

**Parametri di progetto**

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Ovoidale
Dimensioni min [mm]	L=600 × H=1000
Dimensioni max [mm]	L=800 × H=1200
DN equiv. min-max [mm]	764 - 967
Materiale condotta	Calcestruzzo
Problemi condotta rilevati	Infiltrazioni/esfiltrazioni, Fessure/fori, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	50.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 50.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
Mantenere variazione DN	Sì
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Tratto rettilineo

**Tecnologie compatibili**

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 2 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No

**Note tecniche**

[!] **Variazione DN**  
 Queste tecnologie possono gestire l'intera tratta in un unico intervento grazie alla capacità di adattarsi alla variazione di diametro. Tuttavia, l'effettiva fattibilità dipende dall'entità della variazione tra un tratto e l'altro. Si consiglia una verifica tecnica specifica per questo progetto.

Figura 5.11: Caso D - Merano: report tratta 2

A causa della presenza di una variazione dimensionale, nei parametri di progetto vengono riportate le dimensioni sia della sezione minima che di quella massima; inoltre, trattandosi di profilo non circolare, la tabella include i valori di diametro equivalente calcolati per entrambe le sezioni. La nota "Variazione DN" invita l'utente a compiere un'ulteriore verifica di fattibilità in base all'entità della variazione.

La tratta dal pozzetto SW9 al SW10 presenta una peculiarità: tra tutte le tratte analizzate durante l'intera validazione del sistema, è l'unica in cui è presente una variazione della forma della sezione trasversale tra un pozzetto e l'altro. Trattandosi di uno scenario molto raro, nell'algoritmo non è stata implementata una funzione che permetta di inserire due diverse forme in un'unica tratta; pertanto, come illustrato nel report in Figura 5.12, tale tratta è stata gestita in questo modo:

- è stata inserita "ovoidale" come forma della sezione trasversale;
- la sezione minima è circolare DN500; tuttavia, dato che è stato inserito in input un profilo ovoidale, le dimensioni inserite sono state  $L_{\min} = 500$  mm e  $H_{\min} = 500$  mm;

- la sezione massima è stata inserita correttamente: ovoidale 500/750 mm.

### Tratta 3

#### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Ovoidale
Dimensioni min [mm]	L=500 × H=500
Dimensioni max [mm]	L=500 × H=750
DN equiv. min-max [mm]	493 - 604
Materiale condotta	Calcestruzzo
Problemi condotta rilevati	Infiltrazioni/esfiltrazioni, Fessure/fori, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	18.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 18.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Assenti
Mantenere variazione DN	Sì
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Tratto rettilineo

#### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 3 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Iniezioni con robot *	150-800	N/D	Sì

\* Nota: Tecnologia preparatoria - Non ripristina structuralità in classe danno elevata.  
Applicabilità marginale per: Fessure/fori. Verificare attentamente.

Figura 5.12: Caso D - Merano: report tratta 3

Pertanto, la sezione minima è approssimata da circolare DN500 a ovoidale 500/500 mm, ottenendo un  $DN_{eq} = 493\text{mm}$ . Questa semplificazione non comporta incongruenze nella valutazione della tratta, poiché la minima differenza tra DN e  $DN_{eq}$  non implica l'esclusione di nessuna tecnologia.

In Via L. da Vinci, invece, sono presenti due tratte con condotte circolari in gres:

1. dal pozzetto SW10 al SW13: condotta DN200, tratto rettilineo di lunghezza 22 m (corrisponde alla massima distanza tra pozzetti), allacciamenti laterali assenti;
2. dal SW13 al SW11: condotta DN250, tratto con curve localizzate in pozzetti esistenti, lunghezza 85 m, massima distanza tra pozzetti pari a 32 m.

Il collettore principale di Via L. da Vinci è in condizioni relativamente buone, anche se i tubi in gres presentano lunghe crepe. Inoltre, il collettore ha dimensioni inferiori rispetto a quello di Via dei Portici; pertanto, dato che non è consentito l'ingresso di operatori all'interno della condotta, la fase di preparazione della stessa viene eseguita con fresatura robotizzata.

Inoltre, gli allacciamenti privati vengono ricollegati alla condotta principale utilizzando la tecnologia di stuccatura robotizzata con resina epossidica bicomponente [15].

Il report relativo all'intero caso progettuale è riportato nell'Allegato C. Di seguito vengono riassunti i risultati ottenuti dalla valutazione dell'intervento di Merano:

1. tratta SW1-SW8 (Via dei Portici):

- 2 tecnologie utilizzate: CIPP UV e risanamento manuale;
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo: CIPP UV;
- 1 tecnologia utilizzata ma non individuata dall'algoritmo: risanamento manuale;
- 4 tecnologie compatibili selezionate, di cui 1 con nota specifica;

2. tratta SW8-SW9 (Via dei Portici):

- 2 tecnologie utilizzate: CIPP UV e risanamento manuale;
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo: CIPP UV;
- 1 tecnologia utilizzata ma non individuata dall'algoritmo: risanamento manuale;
- 2 tecnologie compatibili selezionate;

3. tratta SW9-SW10 (Via dei Portici):

- 1 tecnologia utilizzata: CIPP UV;
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo: CIPP UV;
- 3 tecnologie compatibili selezionate, di cui 1 con nota;

4. tratta SW10-SW13 (Via L. da Vinci):

- 1 tecnologia utilizzata: CIPP UV;
- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo: CIPP UV;
- 8 tecnologie compatibili selezionate, di cui 2 con nota specifica;

5. tratta SW13-SW11 (Via L. da Vinci):

- 2 tecnologie utilizzate: CIPP UV e iniezioni con robot;
- 2 tecnologie correttamente individuate dall'algoritmo: CIPP UV e iniezioni con robot;
- 7 tecnologie compatibili selezionate, di cui 2 con nota specifica.

In conclusione, l'algoritmo ha valutato correttamente:

- 0 casi progettuali su 1;
- 3 tratte su 5;

- 6 tecnologie utilizzate su 8.

La valutazione di questo caso progettuale tramite l'algoritmo sviluppato fornisce quindi degli errori; infatti, nelle prime due tratte, una tecnologia utilizzata (risanamento manuale) non viene selezionata dall'algoritmo come tecnologia compatibile. Pertanto, dato che l'output si discosta dai risultati previsti, è necessario individuare le cause del problema.

Grazie alla funzionalità implementata nell'algoritmo è stato possibile verificare i motivi dell'esclusione della tecnologia "Risanamento manuale" dall'elenco delle soluzioni compatibili. Per entrambe le tratte il motivo dell'esclusione è stato lo stesso, ossia "il diametro della condotta esistente è troppo piccolo (minimo DN800)": questo messaggio indica che la tecnologia è stata esclusa poiché il diametro della condotta da risanare non rientra nell'intervallo dei diametri risanabili dalla tecnologia; per "Risanamento manuale", il limite inferiore riportato nel database è pari 800 mm. L'errore è dovuto ad un'approssimazione presente nell'algoritmo: come descritto nel Paragrafo 4.3.2, in scenari in cui la forma della condotta esistente non è circolare, il sistema calcola il diametro equivalente della sezione trasversale. Pertanto, nelle due tratte in questione, le dimensioni della sezione ovoidale vengono convertite in un valore di  $DN_{eq}$ :

1. 600/900 mm  $\rightarrow DN_{eq,1} = 725$  mm;
2. 600/1000 mm  $\rightarrow DN_{eq,2a} = 764$  mm e 800/1200 mm  $\rightarrow DN_{eq,2b} = 967$  mm.

Di conseguenza, il risanamento manuale viene escluso in entrambe le tratte; nella seconda tratta sarebbe compatibile con la parte 800/1200 mm, tuttavia non è compatibile con l'intero segmento, perciò non viene selezionata.

L'incongruenza rilevata tra output dell'algoritmo e soluzioni progettuali adottate ha permesso di individuare una lacuna nel sistema. L'approssimazione ( $DN_{eq}$ ) è stata adottata perché:

- semplifica la logica di selezione, poiché il filtro dimensionale è univoco e, per qualsiasi forma di sezione trasversale, confronta il valore di diametro con l'intervallo risanabile dalla tecnologia;
- semplifica il database, il quale contiene solamente le colonne  $DN_{min}$  e  $DN_{max}$ : l'aggiunta di colonne specifiche per varie forme avrebbe implicato problematiche nel reperire le informazioni riguardo alle dimensioni risanabili, spesso non disponibili per sezioni non circolari o ovoidali;
- permette di gestire forme personalizzate inserite dall'utente.

Tuttavia, in casi come quello in questione, può fornire risultati erranei.

Eliminare tale approssimazione per rendere il sistema più accurato sarà comunque possibile in una successiva fase di affinamento dell'algoritmo.



- 1 tecnologia correttamente individuata dall'algoritmo: risanamento manuale;
- 1 tecnologia utilizzata ma non individuata dall'algoritmo: manicotti interni;
- 4 tecnologie compatibili selezionate, di cui 3 con nota specifica.

#### Comune in provincia di Venezia

##### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Ovoidale
Dimensioni [mm]	L=1200 x H=1800
DN equivalente [mm]	1450
Materiale condotta	Calcestruzzo
Problemi condotta rilevati	Separazione giunti, Problemi ai giunti
Classe di danno	1
Lunghezza totale [m]	390.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 57.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Curve localizzate in punti di accesso (Tratti rettilinei)

##### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 4 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità) *	150-2200	A,B	No
* Nota: Applicabilità marginale per: Problemi ai giunti. Verificare attentamente.				
2	CIPP a inversione (a gravità) *	70-2200	A,B,C	No
* Nota: Applicabilità marginale per: Problemi ai giunti. Verificare attentamente.				
3	Spiral wound lining	150-5500	A,B	No
4	Risanamento manuale *	800-10000	N/D	Si
* Nota: Applicabilità marginale per: Problemi ai giunti. Verificare attentamente.				

Figura 5.14: Caso E - Provincia di Venezia: report

Riassumendo, l'algoritmo ha valutato correttamente:

- 0 casi progettuali su 1;
- 0 tratte su 1;
- 1 tecnologia utilizzata su 2.

Pertanto, è presente un errore: "Manicotti interni" è stata esclusa dall'elenco delle tecnologie compatibili, nonostante sia la soluzione adottata nel progetto in questione. La motivazione di tale esclusione è: "la tecnologia non è compatibile con sezione trasversale di forma ovoidale". Infatti, nel database, "Manicotti interni" presenta unicamente "circolare" tra le forme compatibili: ciò è motivato dalle informazioni provenienti dalle guide di settore e dai documenti ufficiali ottenuti dai fornitori dei manicotti stessi, i quali indicano solamente che la tecnologia consente di risanare tubazioni circolari.

Tuttavia, contattando personalmente l'azienda fornitrice degli anelli di tenuta utilizzati in tale progetto, è stato comunicato che l'applicazione di manicotti interni in condotte ovoidali è tecnicamente possibile; tuttavia, trattandosi di un'applicazione non omologata, dev'essere esaminata caso per caso, poiché non esistono certificazioni ufficiali per questa tipologia di intervento.

Pertanto, l'incongruenza tra le risultanze dell'algoritmo e la soluzione progettuale deriva dal fatto che le informazioni presenti nel database sono basate su dati certificati; questa casistica evidenzia una limitazione intrinseca del sistema, ossia la difficoltà nel valutare applicazioni non standardizzate.

### 5.3 Analisi dei risultati della validazione

Dopo aver testato tutti i casi studio disponibili tramite il DSS sviluppato, sono stati analizzati globalmente i risultati ottenuti.

Il processo di validazione ha compreso la valutazione di 60 casi progettuali, per un totale di 89 tratte differenti e 98 tecnologie utilizzate.

La Tabella 5.1 riassume le risultanze del lavoro di validazione svolto.

Tabella 5.1: Analisi dei risultati della validazione del sistema

	<b>Casi progettuali</b>	<b>Tratte</b>	<b>Tecnologie</b>
Numero totale	60	89	98
Individuati correttamente	58	86	95
Accuratezza (%)	96.67	96.63	96.94

I valori riportati in tabella mostrano che, nella maggior parte dei casi, le tecnologie individuate dall'algoritmo includono la soluzione effettivamente adottata; pertanto, i risultati forniti dal programma sono congruenti con le soluzioni progettuali utilizzate. Le elevate percentuali di accuratezza (tutte oltre il 96 %) dimostrano l'efficacia e l'affidabilità del sistema sviluppato. Le uniche incongruenze rilevate riguardano i casi progettuali di Merano, descritto nel Paragrafo 5.2.4, e il Caso E, illustrato nel Paragrafo 5.2.5.

Oltre a verificare la correttezza nell'individuazione della tecnologia utilizzata, ossia la presenza della soluzione adottata nell'elenco fornito dall'algoritmo, per le 86 tratte per cui l'algoritmo ha operato senza commettere errori è stata anche valutata la selettività del sistema. In media, per ciascuna tratta analizzata, l'algoritmo ha selezionato 4.95 tecnologie compatibili, ossia il 33.02 % delle 15 tecnologie presenti nel database. Pertanto, mediamente il sistema permette di ridurre di circa il 67 % il numero di alternative che l'utente deve valutare nel processo decisionale.

Inoltre, è stato calcolato il numero di tecnologie che il sistema propone in aggiunta a quelle effettivamente impiegate; tale indice, definito "surplus", è calcolato come segue:  $\text{surplus} = (\text{N}^\circ \text{ tecnologie compatibili individuate dall'algoritmo}) - (\text{N}^\circ \text{ tecnologie effettivamente utilizzate})$ .

La Tabella 5.2 mostra la distribuzione di frequenza di tale surplus.

Tabella 5.2: Distribuzione del surplus di tecnologie individuate dal sistema

Surplus	N° di tratte	Frequenza (%)
0	4	4.65
1	6	6.98
2	10	11.63
3	27	31.40
4	6	6.98
5	9	10.47
6	12	13.95
7	10	11.63
8	2	2.33
9	0	0.00

Dall'analisi delle tratte validate correttamente emerge che:

- in 4 tratte (4.65 % del totale) l'algoritmo ha individuato esclusivamente le tecnologie realmente utilizzate;
- il risultato più frequente è il surplus di 3 tecnologie, verificatosi per il 31.40 % delle tratte considerate;
- il massimo surplus fornito è pari a 8 tecnologie aggiuntive, verificatosi 2 volte.

In conclusione, si ricorda che le valutazioni volte a individuare la soluzione ottimale tra quelle proposte dall'algoritmo rimangono di competenza dell'utente.

# Capitolo 6

## Considerazioni conclusive

### 6.1 Sintesi del lavoro svolto

Il presente lavoro di tesi ha riguardato l'implementazione di un sistema di supporto decisionale (DSS) per la selezione delle tecnologie *trenchless* per il risanamento delle condotte, a partire dalla revisione della letteratura fino alla sua realizzazione, attraverso le fasi di raccolta delle informazioni, di sviluppo e validazione.

Come anticipato nel Paragrafo 2.1.2, il sistema sviluppato è un modello deterministico caratterizzato da applicabilità generale nel campo delle infrastrutture idrauliche urbane ed è in grado di valutare varie tecnologie in base ai diversi criteri decisionali individuati.

La validazione dei risultati generati dal sistema, illustrata nel Capitolo 5, ha evidenziato l'efficacia e l'affidabilità del processo di selezione automatica implementato.

Lo sviluppo di un'applicazione *stand-alone* che incorpora il database delle tecnologie, l'algoritmo di selezione e l'interfaccia utente grafica, consente di distribuire il programma in modo da permettere all'utente di eseguire il processo automatico di selezione utilizzando esclusivamente l'applicazione *.exe* sviluppata.

Il report PDF, generato automaticamente per ogni progetto valutato, permette all'utente di verificare la correttezza dei dati inseriti e di visualizzare in maniera professionale i risultati generati da sistema; la presenza delle note tecniche e dell'avvertenza finale evidenzia che il programma fornisce un supporto di carattere preliminare e che le decisioni finali spettano a un progettista qualificato.

#### 6.1.1 Limiti del sistema sviluppato

Nonostante il presente lavoro di tesi abbia condotto a risultati significativi, il sistema sviluppato presenta le seguenti limitazioni:

- non prende in considerazione i costi diretti e indiretti relativi alle tecnologie;

- fornisce l'elenco delle tecnologie compatibili senza classificarle dalla più alla meno appropriata;
- gestisce le condotte non circolari tramite l'approssimazione  $DN_{eq}$ , la quale può provocare risultati erranei (ad es. CASO D, Paragrafo 5.2.4);
- ha difficoltà nel valutare scenari non standard (ad es. Caso E, Paragrafo 5.2.5).

Tale difficoltà è dovuta alla natura del database implementato, il quale contiene informazioni certificate riguardo alle prestazioni delle tecnologie. Pertanto, l'algoritmo è in grado di valutare scenari applicativi convenzionali ma non consente di valutare efficacemente scenari non standardizzati.

Inoltre, dato che l'industria collegata alle tecnologie *trenchless* vive un periodo di rapida espansione, in futuro sarà necessario rimanere informati sui progressi delle capacità delle tecnologie esistenti e sullo sviluppo di nuove tecnologie, in modo da garantire l'aggiornamento del database.

## 6.2 Possibili sviluppi futuri

I limiti individuati nel Paragrafo 6.1.1 forniscono degli spunti per la prosecuzione del lavoro. Di seguito vengono elencati alcuni possibili sviluppi del sistema illustrato:

- affinamento dei criteri di selezione presenti, ad esempio:
  - caratterizzazione della dipendenza del lancio massimo da diversi fattori;
  - considerazione del raggio di curvatura, oltre all'angolo, per affinare il criterio di curvatura;
- eliminazione dell'approssimazione  $DN_{eq}$ , attraverso:
  - adeguamento del database tramite l'inserimento delle dimensioni risanabili minime e massime per ogni tipologia di sezione trasversale (almeno per condotte ovoidali);
  - adeguamento dell'algoritmo;
- raccolta di *feedback* da utilizzatori esperti e implementazione di eventuali modifiche suggerite;
- perfezionamento dell'interfaccia grafica, ad esempio:
  - implementazione di una sezione per la consultazione del database delle tecnologie;
  - integrazione della funzionalità di verifica della compatibilità di una tecnologia specifica, descritta nella Sezione 5.1;
- integrazione delle valutazioni economiche;

- implementazione di un database dei costi diretti in termini di €/m in funzione del DN;
- implementazione di una procedura per la stima dei costi indiretti;
- classificazione delle tecnologie compatibili dalla più alla meno appropriata, definendo opportuni parametri/funzioni obiettivo (ad esempio, minimizzazione costi, rispetto tempo di esecuzione, ecc.);
- integrazione dell'intelligenza artificiale nell'algoritmo: questo tema necessita di approfondimenti per individuare le possibili applicazioni dell'intelligenza artificiale nel sistema.

Il Paragrafo 6.2.1 illustra la possibile evoluzione del sistema sviluppato mediante l'integrazione della classificazione delle tecnologie selezionate dalla più alla meno appropriata.

### 6.2.1 Classificazione delle tecnologie

Come anticipato nella Sezione 6.2, l'integrazione della capacità di classificare le tecnologie compatibili è uno dei principali sviluppi possibili del presente lavoro. Tale funzionalità rappresenta un passaggio successivo del sistema, eseguibile a valle dell'individuazione delle tecnologie compatibili.

Per fare ciò, sarà necessario analizzare il processo coinvolto nella scelta della tecnologia da adottare tra le alternative compatibili. Di seguito sono elencati i passaggi fondamentali per ottenere un sistema in grado di classificare le tecnologie selezionate:

- definizione dei parametri di classificazione;
- creazione del database dedicato, attraverso la ricerca e l'acquisizione delle caratteristiche delle tecnologie relative ai parametri individuati;
- scelta dei modelli da utilizzare (es. MAUT, AHP, intelligenza artificiale);
- implementazione dell'algoritmo di classificazione;
- validazione dei risultati generati;
- integrazione all'interno dell'applicazione sviluppata.

Per quanto riguarda la definizione dei parametri di classificazione, sono già state compiute delle valutazioni che hanno permesso di individuare alcuni parametri significativi, qui elencati:

- costi diretti;
- costi indiretti;
- prolungamento della vita utile previsto;

- durata dei lavori.

Lo sviluppo del relativo database richiederà l'acquisizione di numerose informazioni da fonti attendibili.

Inoltre, alcuni dei parametri presenti nell'attuale database del sistema, descritti nel Paragrafo 4.2.2, potranno essere considerati anche durante il processo di classificazione delle tecnologie: ad esempio, in uno scenario in cui è consentita l'apertura di scavi per realizzare l'intervento, le tecnologie che non richiedono scavi potrebbero comunque essere premiate nella classificazione rispetto a quelle che necessitano l'apertura di fosse di accesso.

La scelta del modello dipende da svariati fattori, i quali non sono ancora stati valutati dettagliatamente; i passi successivi dipenderanno da tale scelta.

Una volta integrata la funzionalità di classificazione, il sistema permetterà di classificare le tecnologie compatibili dalla più alla meno appropriata; la struttura prevista per il DSS completo è illustrata nella Figura 6.1.

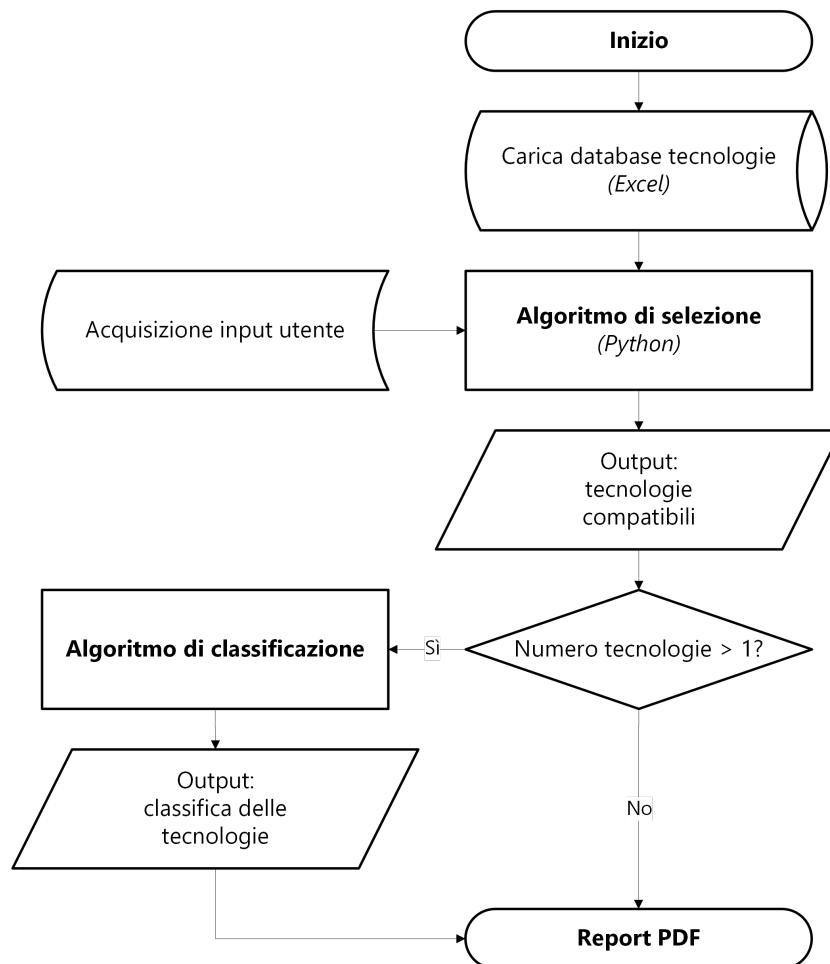


Figura 6.1: Struttura prevista per il DSS con classificazione delle tecnologie

## 6.3 Conclusioni

Per via dello stato di degrado delle infrastrutture idrauliche urbane, come descritto nella Sezione 1.1, in Italia è necessario aumentare la quantità di interventi per il rinnovamento delle reti acquedottistiche e fognarie.

Inoltre, a causa dell'espansione urbanistica, la maggior parte delle reti si trova nel sottosuolo di aree fortemente urbanizzate; pertanto, per ridurre i disagi alla comunità, gli interventi di rinnovamento devono essere realizzati cercando di ridurre al minimo l'apertura di scavi superficiali.

Di conseguenza, le tecnologie di risanamento *trenchless*, grazie ai benefici illustrati nel Paragrafo 1.2.3, sono destinate a ricoprire un ruolo fondamentale nella manutenzione delle infrastrutture idrauliche urbane [32].

Il presente lavoro di tesi, collocato in tale ambito, ha consentito di sviluppare un sistema in grado di fornire un contributo finalizzato a migliorare la qualità del processo di selezione preliminare delle tecnologie *no-dig* per il risanamento delle condotte.

La validazione del sistema di supporto decisionale implementato ha fornito risultati incoraggianti: per il campione di 60 casi progettuali valutati, le percentuali di accuratezza hanno superato il 96 %, evidenziando l'affidabilità del DSS.

La ricerca futura permetterà di migliorare e potenziare ulteriormente il sistema tramite l'integrazione degli sviluppi presentati nella Sezione 6.2.

# Bibliografia

- [1] Ahmed Al-Aghbar. «Automated selection of trenchless technology for rehabilitation of water mains». Master's Thesis. Concordia University, 2005.
- [2] Erez N. Allouche. «A Decision-Support Model for Selection of A Trenchless Construction Method». Ph.D. Thesis. University of Alberta, 2001.
- [3] AttestazioneSOA.it. *Declaratorie Categorie*. URL: <https://www.atestazionesoa.it/approfondimenti/declaratorie-categorie/> (visitato il giorno 03/01/2026).
- [4] Bnova. *Decision Support System: cosa sono, come aiutano le aziende*. URL: <https://www.bnova.it/business-intelligence/decision-support-system/> (visitato il giorno 07/01/2026).
- [5] Renzo Chirulli. *Manuale di tecnologie No-Dig. Le tecniche, le metodologie di progetto e di calcolo*. Nodig.it, 2011. ISBN: 9788890609800.
- [6] Abwasser und Abfall e. V. (DWA) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft. *Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren*. 2015.
- [7] Rohrleitungssanierungsverband e.V. *RSV-Merkblatt 2.2. Tight-In-Pipe-Verfahren für Abwasserleitungen und -kanäle*. 2023.
- [8] Autorità per l'Energia Elettrica il Gas e il Sistema Idrico (AEEGSI). *Relazione Annuale sullo Stato dei servizi e sull'Attività svolta: Volume I — Stato dei servizi*. AEEGSI, 2017.
- [9] M. R. Halfawy e S. Baker. «GIS-based decision support system for evaluating costs and benefits of sewer renewal technologies». In: *International No-Dig Show Conference Proceedings* (29 mar. 2009). Toronto, ON, 2009, pp. 1–11.
- [10] Makarand Hastak, Sanjiv Gokhale e Vamshidhar Thakkallapalli. «Decision model for assessment of underground pipeline rehabilitation options». In: *Urban Water Journal* 1.1 (2004), pp. 27–37. DOI: 10.1080/15730620410001732071.
- [11] Stefano Mambretti e Stefano Tani. *Tecniche di buona condotta. L'innovazione nel rinnovamento delle reti del Servizio Idrico*. MM Academy, 2018.

- [12] J. C. Matthews et al. «Analysis of Wastewater and Water System Renewal Decision-Making Tools and Approaches». In: *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 3 (4 2012), pp. 99–105. DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000114.
- [13] John C. Matthews. «Integrated, multi-attribute decision support system for the evaluation of underground utility construction methods». Ph.D. Thesis. Louisiana Tech University, 2010.
- [14] ASM Merano. *Rinnovo delle infrastrutture nei Portici e in via Leonardo da Vinci a Merano. Lotto 1: Risanamento rete fognaria. Progetto esecutivo*. Planimetria generale di progetto 1:500. Feb. 2023.
- [15] ASM Merano. *Rinnovo delle infrastrutture nei Portici e in via Leonardo da Vinci a Merano. Lotto 1: Risanamento rete fognaria. Progetto esecutivo*. Relazione tecnica. Feb. 2023.
- [16] M. Najafi e S. Gokhale. *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal, Second Edition (Pb)*. McGraw-Hill Education, 2025. ISBN: 9781265716097.
- [17] UNI Ente Italiano di Normazione. *UNI EN ISO 11295:2022. Sistemi di tubazioni di materia plastica utilizzati per il rinnovamento delle condotte - Classificazione e quadro generale delle attività strategiche, tattiche e operative*. 2022.
- [18] UNI Ente Italiano di Normazione. *UNI/PdR 175:2025. Metodologie e sistemi per il rinnovamento, la connessione e la manutenzione delle tubazioni di scarico a gravità (max. 0,5 bar) con tecnologie CIPP (Cured In Place Pipe)*. 2025.
- [19] UNI Ente Italiano di Normazione. *UNI/PdR 26.1:2017. Tecnologia di realizzazione delle infrastrutture interrate a basso impatto ambientale - Sistemi per la localizzazione e mappatura delle infrastrutture nel sottosuolo*. 2017.
- [20] UNI Ente Italiano di Normazione. *UNI/PdR 37:2018. Risanamento senza scavo di tubazioni sotterranee rigide per acqua potabile mediante rivestimento con malte cementizie o resine*. 2018.
- [21] Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA). *Relazione Annuale sullo Stato dei servizi e sull'Attività svolta: Volume I — Stato dei servizi*. ARERA, 2024.
- [22] Repubblica Italiana. *Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale*. Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006.
- [23] CAP Holding S.p.A. *Relining strutturale rete idrica Viale Isonzo - Rozzano. Progetto esecutivo*. Relazione Tecnico Descrittiva. Dic. 2018.
- [24] CAP Holding S.p.A. *Risanamento rete idrica DN300 con la tecnologia del relining interno Viale Isonzo. Configurazione finale*. Planimetria stato di progetto relining. Nov. 2018.

- [25] ETRA S.p.A. *Risanamento condotta fognaria DN 300 ca lungo la SS47 in comune di Limena, tra via Bocche e via Montello. Progetto esecutivo*. Planimetria di progetto. Mag. 2024.
- [26] ETRA S.p.A. *Risanamento condotta fognaria DN 300 ca lungo la SS47 in comune di Limena, tra via Bocche e via Montello. Progetto esecutivo*. Relazione descrittiva. Mag. 2024.
- [27] Eirini Savvadelli, Yiannis Kiouvrekis e Angelika Kokkinaki. «A Literature Review on Rule-Based Systems as Decision Support Systems». In: *Human Aspects of Information Security and Assurance*. A cura di Steven Furnell e Nathan Clarke. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 376–388. ISBN: 978-3-032-02504-3.
- [28] Tariq Shehab e Osama Moselhi. «A decision support system for rehabilitation of sewer pipes». In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 28 (feb. 2011), pp. 394–401. DOI: 10.1139/cjce-28-3-394.
- [29] Rotech Srl. *Guida alle tecnologie di riabilitazione per condotte e tubazioni*. 4<sup>a</sup> ed. 2025.
- [30] Stefano Tani. *Introduzione alle "Tecnologie Trenchless"*. Slide del corso "Tecnologie a basso impatto ambientale per le infrastrutture idrauliche". 2025.
- [31] Enciclopedia Treccani. *Algoritmo - Enciclopedia - Treccani*. URL: <https://www.treccani.it/enciclopedia/algoritmo/> (visitato il giorno 23/01/2026).
- [32] Italian Association for Trenchless Technology (IATT). *Italia NO DIG – La rivista nazionale delle tecnologie a basso impatto ambientale N.3/2025. Il ruolo delle tecnologie no-dig nell'ingegneria moderna*. IATT, 2025.
- [33] Italian Association for Trenchless Technology (IATT). *Tecnologie di riabilitazione e rinnovamento di infrastrutture a rete con limitato ricorso a scavi con metodi tradizionali (Trenchless - No-Dig): Classificazione ed inquadramento normativo*. 2014.
- [34] Italian Association for Trenchless Technology (IATT). *Trenchless Technologies. Guida per l'impiego delle tecnologie a basso impatto ambientale*. IATT, 2024.



Allegato A

Impianto idroelettrico in Val  
Venosta: report

## REPORT ANALISI COMPATIBILITA

Algoritmo per la selezione di Tecnologie di Risanamento Trenchless

<b>Nome progetto:</b>	Impianto idroelettrico in Val Venosta
<b>Data analisi:</b>	02/03/2026 alle ore 17:45
<b>Numero tratte:</b>	1
<b>Utente:</b>	FM

### Impianto idroelettrico in Val Venosta

#### Parametri di progetto

<b>Tipo di rete</b>	Galleria di derivazione per impianto idroelettrico
<b>Funzionamento</b>	Pressione
<b>Forma sezione trasversale</b>	Circolare
<b>Diametro [mm]</b>	3000
<b>Materiale condotta</b>	Calcestruzzo armato
<b>Problemi condotta rilevati</b>	Infiltrazioni/esfiltrazioni
<b>Classe di danno</b>	2
<b>Lunghezza totale [m]</b>	1000.0
<b>Accesso condotta</b>	Nuove aperture o nuovi pozzetti
<b>Allacciamenti e derivazioni laterali</b>	Assenti
<b>Riduzione DN accettabile</b>	Si
<b>Curvatura massima [°]</b>	Tratto rettilineo
<b>Pressione di esercizio [bar]</b>	6.0

#### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 3 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	Discrete pipes (relining PRFV)	100-4200	A,B	No
2	Risanamento manuale *	800-10000	N/D	Si
* Nota: Verificare la massima pressione di esercizio supportata per questo diametro con il fornitore della tecnologia.				
3	Manicotti interni *	150-6000	N/D	Si
* Nota: Riparazione puntuale - Non ripristina structuralità completa.				

**AVVERTENZA**

I risultati sono generati da un processo di selezione automatico basato sui dati forniti dall'utente e sul database tecnico e sono finalizzati a fornire supporto decisionale preliminare.

Solo professionisti qualificati con adeguata conoscenza delle tecnologie di risanamento trenchless sono in grado di valutare l'accuratezza dei dati inseriti, la plausibilità dei risultati e la loro applicabilità al caso specifico.

La decisione dell'effettiva tecnologia da adottare e la relativa progettazione sono step successivi che richiedono ulteriori approfondimenti da parte del progettista.

**Allegato B**

**Limena, Via Del Santo: report**

## REPORT ANALISI COMPATIBILITA

Algoritmo per la selezione di Tecnologie di Risanamento Trenchless

<b>Nome progetto:</b>	Limena, Via Del Santo
<b>Data analisi:</b>	02/03/2026 alle ore 17:51
<b>Numero tratte:</b>	2
<b>Utente:</b>	FM
<b>Configurazione:</b>	Tratte consecutive

### Tratta 1

#### Parametri di progetto

<b>Tipo di rete</b>	Fognatura
<b>Funzionamento</b>	Gravità
<b>Forma sezione trasversale</b>	Circolare
<b>Diametro [mm]</b>	350
<b>Materiale condotta</b>	Cemento-amianto
<b>Problemi condotta rilevati</b>	Corrosione, Problemi strutturali
<b>Classe di danno</b>	3
<b>Lunghezza totale [m]</b>	745.0
<b>Accesso condotta</b>	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 38.0 m)
<b>Allacciamenti e derivazioni laterali</b>	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
<b>Riduzione DN accettabile</b>	No
<b>Curvatura massima [°]</b>	Lieve (5-15°)

#### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 4 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Close-fit - Tubi pre-deformati	100-500	A,B	No
4	TIP-method (Tight In Pipe)	150-1200	A	No

#### Note tecniche

**[i] Lancio massimo**

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

**[i] Verifica accesso senza scavo**

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità), Close-fit - Tubi pre-deformati, TIP-method (Tight In Pipe). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

## Tratta 2

### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Circolare
Diametro [mm]	300
Materiale condotta	Cemento-amianto
Problemi condotta rilevati	Corrosione, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	432.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 49.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Curve localizzate in punti di accesso (Tratti rettilinei)

### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 6 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Close-fit - Tubi pre-deformati	100-500	A,B	No
4	Spiral wound lining	150-5500	A,B	No
5	TIP-method (Tight In Pipe)	150-1200	A	No
6	Manicotti interni *	150-6000	N/D	Si

\* Nota: Riparazione puntuale - Non ripristina structuralità completa.

### Note tecniche

#### [i] Lancio massimo

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

#### [i] Verifica accesso senza scavo

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità), Close-fit - Tubi pre-deformati, TIP-method (Tight In Pipe). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

## Tecnologie compatibili con tutte le tratte

---

Le seguenti 4 tecnologie sono compatibili con tutte le 2 tratte:

1. **CIPP UV (a gravità)**
2. **CIPP a inversione (a gravità)**
3. **Close-fit - Tubi pre-deformati**
4. **TIP-method (Tight In Pipe)**

### **AVVERTENZA**

I risultati sono generati da un processo di selezione automatico basato sui dati forniti dall'utente e sul database tecnico e sono finalizzati a fornire supporto decisionale preliminare.

Solo professionisti qualificati con adeguata conoscenza delle tecnologie di risanamento trenchless sono in grado di valutare l'accuratezza dei dati inseriti, la plausibilità dei risultati e la loro applicabilità al caso specifico.

La decisione dell'effettiva tecnologia da adottare e la relativa progettazione sono step successivi che richiedono ulteriori approfondimenti da parte del progettista.

Allegato C

Merano, Via dei Portici: report

## REPORT ANALISI COMPATIBILITA

Algoritmo per la selezione di Tecnologie di Risanamento Trenchless

<b>Nome progetto:</b>	Merano, Via dei Portici
<b>Data analisi:</b>	02/03/2026 alle ore 18:05
<b>Numero tratte:</b>	5
<b>Utente:</b>	FM
<b>Configurazione:</b>	Tratte consecutive

### Tratta 1

#### Parametri di progetto

<b>Tipo di rete</b>	Fognatura
<b>Funzionamento</b>	Gravità
<b>Forma sezione trasversale</b>	Ovoidale
<b>Dimensioni [mm]</b>	L=600 × H=900
<b>DN equivalente [mm]</b>	725
<b>Materiale condotta</b>	Calcestruzzo
<b>Problemi condotta rilevati</b>	Infiltrazioni/esfiltrazioni, Fessure/fori, Problemi strutturali
<b>Classe di danno</b>	3
<b>Lunghezza totale [m]</b>	346.0
<b>Accesso condotta</b>	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 57.0 m)
<b>Allacciamenti e derivazioni laterali</b>	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
<b>Riduzione DN accettabile</b>	No
<b>Curvatura massima [°]</b>	Tratto rettilineo

#### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 4 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Spiral wound lining	150-5500	A,B	No
4	Iniezioni con robot *	150-800	N/D	Si

\* Nota: Tecnologia preparatoria - Non ripristina structuralità in classe danno elevata.  
Applicabilità marginale per: Fessure/fori. Verificare attentamente.

### Note tecniche

#### [i] Lancio massimo

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

#### [i] Verifica accesso senza scavo

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

## Tratta 2

### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Ovoidale
Dimensioni min [mm]	L=600 × H=1000
Dimensioni max [mm]	L=800 × H=1200
DN equiv. min-max [mm]	764 - 967
Materiale condotta	Calcestruzzo
Problemi condotta rilevati	Infiltrazioni/esfiltrazioni, Fessure/fori, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	50.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 50.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
Mantenere variazione DN	Sì
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Tratto rettilineo

### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 2 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No

### Note tecniche

#### [!] Variazione DN

Queste tecnologie possono gestire l'intera tratta in un unico intervento grazie alla capacità di adattarsi alla variazione di diametro. Tuttavia, l'effettiva fattibilità dipende dall'entità della variazione tra un tratto e l'altro. Si consiglia una verifica tecnica specifica per questo progetto.

#### [i] Lancio massimo

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

**[i] Verifica accesso senza scavo**

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

### Tratta 3

#### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Ovoidale
Dimensioni min [mm]	L=500 × H=500
Dimensioni max [mm]	L=500 × H=750
DN equiv. min-max [mm]	493 - 604
Materiale condotta	Calcestruzzo
Problemi condotta rilevati	Infiltrazioni/esfiltrazioni, Fessure/fori, Problemi strutturali
Classe di danno	3
Lunghezza totale [m]	18.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 18.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Assenti
Mantenere variazione DN	Sì
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Tratto rettilineo

#### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 3 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Iniezioni con robot *	150-800	N/D	Sì

\* Nota: Tecnologia preparatoria - Non ripristina structuralità in classe danno elevata.  
 Applicabilità marginale per: Fessure/fori. Verificare attentamente.

#### Note tecniche

##### [!] **Variazione DN**

Queste tecnologie possono gestire l'intera tratta in un unico intervento grazie alla capacità di adattarsi alla variazione di diametro. Tuttavia, l'effettiva fattibilità dipende dall'entità della variazione tra un tratto e l'altro. Si consiglia una verifica tecnica specifica per questo progetto.

##### [i] **Lancio massimo**

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

**[1] Verifica accesso senza scavo**

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

## Tratta 4

### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Circolare
Diametro [mm]	200
Materiale condotta	Gres
Problemi condotta rilevati	Fessure/fori
Classe di danno	2
Lunghezza totale [m]	22.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 22.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Assenti
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Tratto rettilineo

### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 8 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Close-fit - Tubi pre-deformati	100-500	A,B	No
4	Spiral wound lining	150-5500	A,B	No
5	Pipe bursting (Berstlining)	50-1200	A	No
6	TIP-method (Tight In Pipe)	150-1200	A	No
7	Iniezioni con robot *	150-800	N/D	Si
* Nota: Tecnologia preparatoria - Non ripristina structuralità in classe danno elevata. Applicabilità marginale per: Fessure/fori. Verificare attentamente.				
8	Manicotti interni *	150-6000	N/D	Si
* Nota: Riparazione puntuale - Non ripristina structuralità completa.				

### Note tecniche

#### [i] Lancio massimo

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

**[1] Verifica accesso senza scavo**

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità), Close-fit - Tubi pre-deformati, Pipe bursting (Berstlining), TIP-method (Tight In Pipe). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

## Tratta 5

### Parametri di progetto

Tipo di rete	Fognatura
Funzionamento	Gravità
Forma sezione trasversale	Circolare
Diametro [mm]	250
Materiale condotta	Gres
Problemi condotta rilevati	Fessure/fori
Classe di danno	2
Lunghezza totale [m]	85.0
Accesso condotta	Solo pozzetti esistenti (Distanza massima tra pozzetti: 32.0 m)
Allacciamenti e derivazioni laterali	Presenti (Ripristino dall'interno della condotta)
Riduzione DN accettabile	No
Curvatura massima [°]	Curve localizzate in punti di accesso (Tratti rettilinei)

### Tecnologie compatibili

Sulla base dei parametri forniti, di seguito sono elencate le tecnologie di risanamento risultate tecnicamente compatibili.

Sono state identificate 7 tecnologie compatibili.

#	Tecnologia	DN [mm]	Classe statica	Puntuale
1	CIPP UV (a gravità)	150-2200	A,B	No
2	CIPP a inversione (a gravità)	70-2200	A,B,C	No
3	Close-fit - Tubi pre-deformati	100-500	A,B	No
4	Spiral wound lining	150-5500	A,B	No
5	TIP-method (Tight In Pipe)	150-1200	A	No
6	Iniezioni con robot *	150-800	N/D	Si
* Nota: Tecnologia preparatoria - Non ripristina structuralità in classe danno elevata. Applicabilità marginale per: Fessure/fori. Verificare attentamente.				
7	Manicotti interni *	150-6000	N/D	Si
* Nota: Riparazione puntuale - Non ripristina structuralità completa.				

### Note tecniche

#### [i] Lancio massimo

I valori di lancio massimo sono riferimenti teorici. La lunghezza effettiva del tratto risanabile in un unico intervento dipende da numerosi fattori specifici del sito (es. diametro della condotta, presenza di curve...). Si raccomanda di verificare con il fornitore della tecnologia la fattibilità per le condizioni specifiche di questo progetto.

**[1] Verifica accesso senza scavo**

Poiché non è possibile effettuare scavi, si raccomanda una verifica aggiuntiva per le seguenti tecnologie: CIPP UV (a gravità), CIPP a inversione (a gravità), Close-fit - Tubi pre-deformati, TIP-method (Tight In Pipe). Controllare che il diametro della condotta e le dimensioni delle camerette siano compatibili con i loro specifici requisiti di installazione.

## Tecnologie compatibili con tutte le tratte

---

Le seguenti 2 tecnologie sono compatibili con tutte le 5 tratte:

1. **CIPP UV (a gravità)**
2. **CIPP a inversione (a gravità)**

### **AVVERTENZA**

I risultati sono generati da un processo di selezione automatico basato sui dati forniti dall'utente e sul database tecnico e sono finalizzati a fornire supporto decisionale preliminare.

Solo professionisti qualificati con adeguata conoscenza delle tecnologie di risanamento trenchless sono in grado di valutare l'accuratezza dei dati inseriti, la plausibilità dei risultati e la loro applicabilità al caso specifico.

La decisione dell'effettiva tecnologia da adottare e la relativa progettazione sono step successivi che richiedono ulteriori approfondimenti da parte del progettista.

