

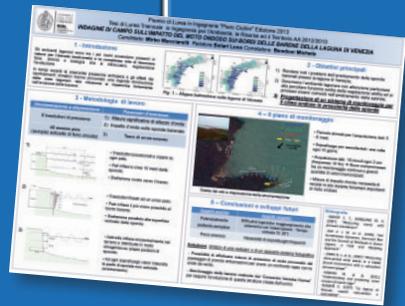
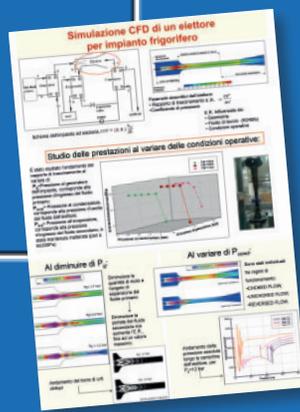
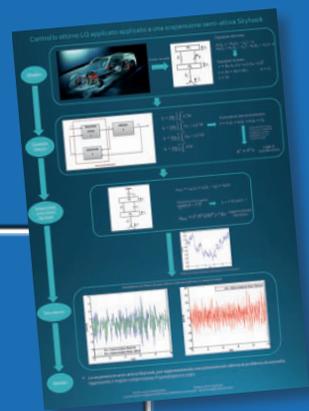
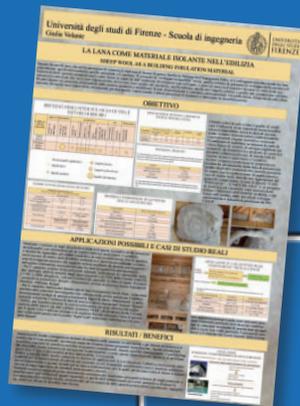
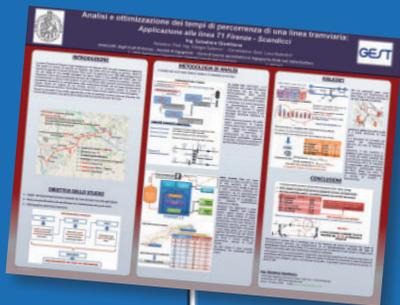
PREMIO DI LAUREA IN INGEGNERIA

“PIERO CIULLINI” edizione 2013

progettando ing

ANNO X, N. 3 LUGLIO-SETTEMBRE 2015

Poste Italiane s.p.a. - Sped. in A. P. - D.L. 353/2003 [conv. in L. 27/02/2004 n° 46] art. 1, comma 1, DCB Firenze 1



Nerbini

BANDO PREMIO DI LAUREA IN INGEGNERIA
“PIERO CIULLINI”

ANNO 2013

A CURA DI
ALESSANDRO MATTEUCCI

*Trimestrale d'informazione
dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Firenze*

Viale Milton 65 – 50129 Firenze
Tel. 055/213704 – Fax 055/2381138
e-mail: info@ordineingegneri.fi.it
URL: www.ordineingegneri.fi.it

Anno X, n. 3
luglio-settembre 2015

Direttore: Giuliano Gemma
(progettando.direttore@nerbini.it)

Curatore del numero speciale: Alessandro Matteucci

Comitato di redazione: Daniele Berti, Alessandro Bonini,
Piero Caliterna, Maria Francesca Casillo, Carlotta Costa,
Beatrice Giachi, Alberto Giorgi, Nicoletta Mastroleo,
Alessandro Matteucci, Daniela Turazza

Direttore responsabile: Cinzia De Salvia

© 2015 – Edizioni Nerbini
Via G.B. Vico, 11 – 50136 Firenze
Tel. 055/200.1085
e-mail: edizioni@nerbini.it
www.nerbini.it

ISSN 2035-7125
ISBN 978-88-6434-168-2

Realizzazione editoriale: Prohemio editoriale srl, Firenze

Segreteria di redazione: Francesca Serci
(progettando.redazione@nerbini.it)

Redazione: Andrea Schillaci

Impaginazione: Barbara Giovannini
(ufficiografico@nerbini.it)

Prestampa e versione digitale: Inscripta

Stampa: GoPrint, Camisano Vicentino (VI)

Autorizzazione del Tribunale di Firenze
n. 5493 del 31.5.2006 (R.O.C. n. 17419)

Gli articoli firmati esprimono solo l'opinione dell'autore
e non impegnano l'Ordine e/o la direzione e/o l'editore
della rivista.



SOMMARIO

4 **Introduzione**
di Alessandro Matteucci

SETTORE CIVILE E AMBIENTALE

LAUREA TRIENNALE

5 Indagine di campo sull'impatto del moto ondoso sui bordi delle barene lagunari in laguna di Venezia
Mirko Mucciarelli

9 La lana come materiale isolante nell'edilizia
Giulia Volante

LAUREA MAGISTRALE

16 Profili di acciaio in parete sottile soggetti a sforzo normale eccentrico. Analisi non lineare agli elementi finiti ed esempio applicativo
Francesco Socci

21 Analisi e ottimizzazione dei tempi di percorrenza di una linea tramviaria. "Applicazione alla Linea T1 Firenze - Scandicci"
Salvatore Giambona

SETTORE INDUSTRIALE

LAUREA TRIENNALE

27 Simulazione CFD di un eiettore per impianto frigorifero
Marilena Zarrillo

LAUREA MAGISTRALE

33 Ricostruzione tridimensionale della struttura spaziale della scena in opere d'arte pittoriche con prospettiva frontale
Niccolò Vanni

SETTORE INFORMAZIONE

LAUREA TRIENNALE

38 Modellizzazione e stabilizzazione di un veicolo a due ruote monoassiale
Matteo Galanti

42 Controllo ottimo lineare-quadratico applicato ad una sospensione semiattiva sky-hook
Davide Miceli

LAUREA MAGISTRALE

47 Tecniche di monitoraggio e controllo delle linee della rete di trasmissione nazionale
Francesco Laponi

52 Analisi di affidabilità di schede elettroniche e human factor nell'utilizzo di dispositivi medici
Chiara Risaliti

INTRODUZIONE

DI **Alessandro Matteucci**

QUANDO NEL 2009 proponemmo con il Presidente Paolo Della Queva di attivare i due premi di Laurea intitolati a Piero Ciullini e Andrea Chiarugi, una delle principali motivazioni fu quella di dare risalto alle capacità dei giovani ingegneri, sia che fossero appena laureati o professionisti già iscritti al nostro Albo.

Nel caso del premio Ciullini in particolare, l'intenzione era quella di premiare i neolaureati più meritevoli dei tre settori dell'ingegneria, dando un segno di riconoscimento per l'attività di studio o ricerca svolta in occasione del lavoro relativo alle proprie tesi.

I colleghi del Consiglio di allora accettarono con grande entusiasmo la proposta e grande fu anche la partecipazione degli iscritti in occasione della premiazione, in quanto intravidero subito la bontà dell'iniziativa che di fatto rappresenta anche la finalizzazione di una parte, seppur piccola, della quota di iscrizione annuale, volta a valorizzare l'impegno dei più giovani da parte dei colleghi più anziani.

L'auspicio era anche quello di consolidare lo spirito di appartenenza ad una categoria professionale, in modo di creare un legame fra generazioni.

In questo numero speciale abbiamo inserito le tesi di Laurea che sono state premiate come le più meritevoli per l'anno 2013. Occorre dire che la scelta non è stata facile perché il livello dei lavori presentati è sempre stato elevato e corrispondente alle aspettative delle commissioni di valutazione costituite da Consiglieri e Docenti Universitari.

Nel momento della stampa di questo numero probabilmente saranno in corso le valutazioni degli elaborati presentati per la quarta edizione del premio e, nell'auspicio del consolidamento di questa tradizione, non mi rimane che augurare a tutti una buona lettura ed agli autori una splendida carriera professionale.

INGEGNERE IUNIOR

Mirko Mucciarelli

TITOLO TESI: *Indagine di campo sull'impatto del moto ondoso sui bordi delle barene lagunari in laguna di Venezia*

RELATORE: Prof. Ing. Luca Solari

CORRELATORE: Ing. Phd Michele Bendoni

Inquadramento del tema trattato e del lavoro svolto

Il lavoro di tesi tratta della progettazione di un sistema di monitoraggio, funzionale ad una specifica campagna di misure futura incentrata sulla descrizione del clima ondoso a bordo barena, una delle principali cause dell'arretramento delle barene nella laguna veneta.

Gli ambienti lagunari sono tra i più ricchi ecosistemi presenti in natura per l'elevata biodiversità e la complessa rete di fenomeni fisici, chimici e biologici che si intrecciano, regolandone l'evoluzione. In tempi recenti la crescente pressione antropica e gli effetti dei cambiamenti climatici hanno provocato una ingente diminuzione delle aree lagunari: tale riduzione si rispecchia fortemente nell'erosione delle barene. Tra le diverse strutture morfologiche presenti negli ambienti lagunari le barene sono aree dal profilo pianeggiante periodicamente sommerse dalla marea, coperte di vegetazione alofila e attraversate da canali meandriciformi.

Un ecosistema caratterizzato da erosione delle aree barenali è la laguna di Venezia, a cui si è fatto riferimento specifico durante lo sviluppo della tesi in questione. Le barene possono essere considerate il principale indicatore della "stato di salute" lagunare: mentre ad inizio secolo occupavano circa il 20% dell'intera laguna, un'indagine del Comune di Venezia del 1997 ha dichiarato che sono passate a rappresentare poco più dell'8%.

Il moto ondoso, sia da vento che da barca, è uno dei principali responsabili del fenomeno erosivo. A

questa causa primaria si aggiungono inoltre la deviazione e la successiva estromissione di alcuni fiumi che un tempo sfociavano in laguna, l'allargamento delle bocche di porto, lo scavo di canali industriali per permettere alle grandi navi di raggiungere l'area di Porto Marghera e l'uso di tecniche di pesca fortemente impattanti, che rappresentano delle concause che hanno accelerato il fenomeno erosivo in laguna. È stato stimato che ogni anno la laguna perda più di 1 milione di metri cubi di sedimenti e detriti che vengono così dispersi in mare (Ramieri, 1997). Inoltre in uno studio di Day del 1999, è stato notato che tale processo potrebbe intensificarsi anche a causa dell'aumento della profondità della laguna e dell'innalzamento relativo del livello medio del mare, mettendo gravemente a rischio il futuro della laguna se non verranno tempestivamente prese idonee misure per prevenire l'erosione. La drastica conseguenza a cui si potrebbe giungere è la trasformazione graduale della laguna in un braccio di mare con la progressiva scomparsa delle strutture caratteristiche, quali velme, barene, chiari, ed un conseguente aumento della salinità dell'acqua, il rafforzamento delle correnti ivi presenti ed un sensibile ridimensionamento del grado di biodiversità.

Lo scopo principale di tale lavoro è stato quello di fornire una descrizione approfondita della metodologia utile per la stima del clima ondoso a bordo barena, essendo il moto ondoso da vento uno dei principali responsabili del fenomeno erosivo. Nell'ambito di tale progetto sono state poste le basi per la realizzazione



1 - Introduzione

Gli ambienti lagunari sono tra i più ricchi ecosistemi presenti in natura per l'elevata biodiversità e la complessa rete di fenomeni fisici, chimici e biologici che si intrecciano, regolandone l'evoluzione.

In tempi recenti la crescente pressione antropica e gli effetti dei cambiamenti climatici hanno provocato una ingente diminuzione delle aree lagunari: tale riduzione si rispecchia fortemente nell'erosione delle barene.

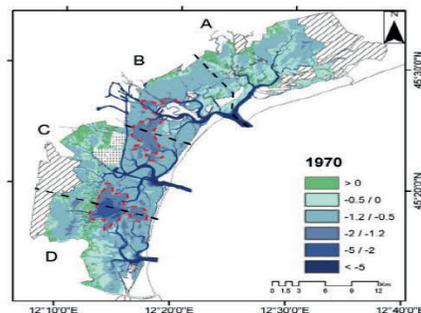
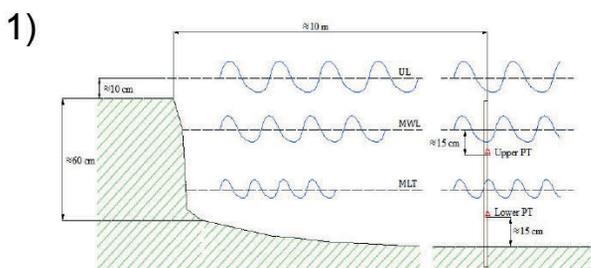


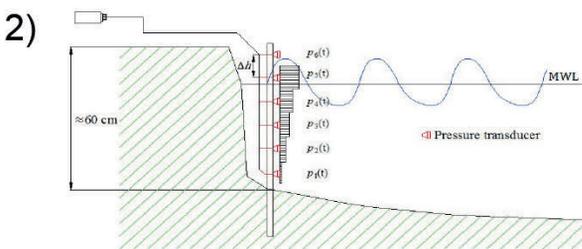
Fig. 1 – Mapa batimetrica

3 - Metodologia di lavoro

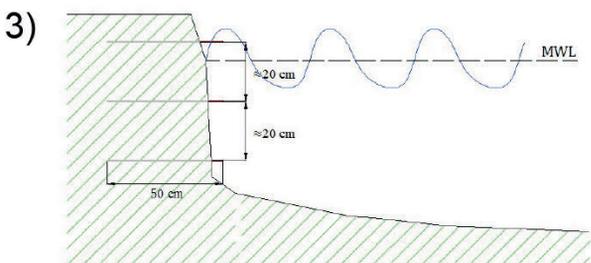
Strumentazione a disposizione	Parametri d'interesse
6 trasduttori di pressione	1) Misure significative di altezze d'onda
40 erosion pins (semplici asticelle di ferro zincato)	2) Impatto d'onda sulla sponda barenale
	3) Tasso di arretramento



- Trasduttori posizionati a coppie su ogni palo;
- Pali infissi a circa 10 metri dalla sponda;
- Diaframma rivolto verso il basso.



- Trasduttori fissati ad un unico palo;
- Palo infisso il più vicino possibile al bordo barena;
- Diaframma parallelo alla superficie verticale della sponda.



- Asticelle infisse orizzontalmente nel terreno e distribuite in modo omogeneo su ampie porzioni di sponda;
- Ad ogni sopralluogo viene misurata la parte di sponda non colorata (arretramento).

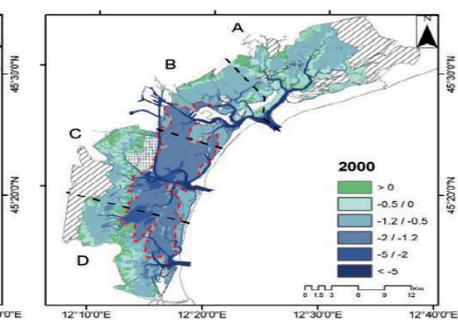


Sce

As
Po
più
P

Soluzio

- Possi
passag
onde da
- Monit
per seg

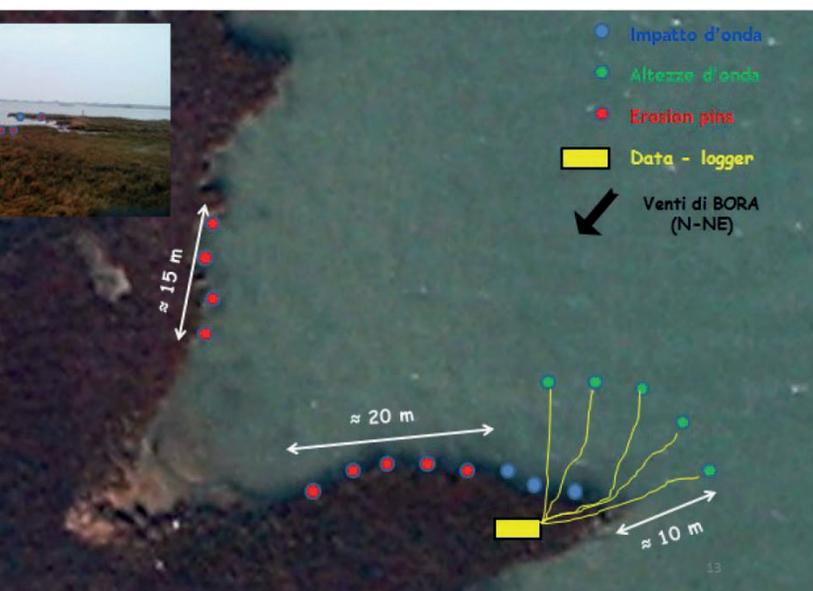


ica sulla laguna di Venezia

2 - Obiettivi principali

- 1) Rendere noti i problemi dell'arretramento delle sponde barenali presso la laguna di Venezia;
- 2) Descrivere l'ambiente lagunare con attenzione particolare alla peculiare funzione svolta dalla vegetazione alofila ed ai processi erosivi coinvolti nell'arretramento delle sponde;
- 3) **Progettazione di un sistema di monitoraggio per il clima ondoso in prossimità delle sponde**

4 – Il piano di monitoraggio



scelta del sito e disposizione della strumentazione

- Periodo stimato per l'acquisizione dati: 5 - 6 mesi;
- Sopralluogo per raccolta dati: una volta ogni 15 giorni;
- Acquisizione dati: 10 minuti ogni 2 ore (frequenza 10 Hz) → Buon compromesso tra un monitoraggio continuo e grandi quantità di valori memorizzati;
- Misure di impatto d'onda: necessità di recarsi in sito durante fenomeni importanti di moto ondoso.

5 – Conclusioni e sviluppi futuri

Aspetti positivi	Aspetti negativi
Potenzialmente piuttosto semplice	Difficoltà logistiche (raggiungimento sito solamente con imbarcazione - Tempo stimato 1h 30')
Poco oneroso	Necessità di sopralluoghi frequenti

zione: Utilizzo di una webcam o di un apposito sistema fotografico

possibilità di effettuare misure di pressione di onde provocate dal passaggio di piccole imbarcazioni per avere un confronto reale con le onde da vento.

monitoraggio delle barene costruite dal "Consorzio Venezia Nuova" per seguire l'evoluzione di queste strutture create dall'uomo.

Bibliografia

- BISHOP C. T., DONELAND M. A. (1987), "Measuring waves with pressure transducers"
- DAY Jr J. W. et al. (1999) "Soil Accretionary Dynamics, Sea-Level Rise and the Survival of Wetlands in Venice Lagoon: a Field and Modeling Approach"
- JONES N. L. et al., (2007) "Measuring short-period wind waves in a tidally forced environment with a subsurface pressure gauge"
- MARANI M. et al. (2011) "Understanding and predicting wave erosion of marsh edge"
- RAMIERI E. (1997) "La laguna di Venezia: aspetti naturalistici e sostenibilità"

di una campagna di misure presso la laguna di Venezia che avrà lo scopo di monitorare, in maniera continua, il clima ondoso a bordo barena e l'evoluzione della barena stessa. Tale studio, quindi, ha voluto rappresentare una sorta di approccio iniziale al problema, cercando di mostrare eventuali complicazioni che potranno sorgere nella campagna futura e fornendo, inoltre, una prima stima delle forzanti d'onda caratteristiche della laguna veneta.

La tesi di laurea si sviluppa attraverso un capitolo iniziale principalmente descrittivo: un primo paragrafo, più generale, riguarda la laguna di Venezia; il secondo, più specifico, illustra una delle più tipiche strutture morfologiche appartenenti all'ambiente lagunare, ossia le barene; il terzo, invece, introduce le minacce a cui sono sottoposte ultimamente le barene, mostrando i processi erosivi coinvolti e l'effetto della vegetazione sui sedimenti. La trattazione segue con il secondo capitolo in cui vengono introdotti i parametri fisici d'interesse ed i passaggi teorici che stanno alla base delle misure di pressione studiate. Il terzo capitolo è dedicato all'esposizione della progettazione del sistema di monitoraggio con la scelta del sito adatto alle misure e la descrizione del posizionamento effettivo delle sonde, operazioni delicate e fondamentali per ricavare dati veramente funzionali all'obiettivo dichiarato; viene inoltre ampiamente descritta la strumentazione impiegata con degli accenni al reale funzionamento dei trasduttori utilizzati. Tutto ciò che è stato descritto nel capitolo suddetto è stato possibile grazie ad alcuni sopralluoghi in laguna che hanno permesso di ottenere un contatto effettivo con la realtà. Nel quarto capitolo, infine, si riporta la messa a punto delle sonde attraverso l'operazione di calibrazione ed alcuni grafici relativi alle misure di pressione, la cui analisi fornisce un'indicazione del clima ondoso presente in laguna.

Il fulcro del lavoro consiste nella sistemazione e successiva collocazione degli strumenti a disposizione, i quali saranno necessari per monitorare il clima ondoso e l'arretramento del bordo barenale: i trasduttori di pressione e gli erosion pins (semplici aste filettate di ferro zincato).

Per quanto riguarda il collocamento delle sonde di pressione va riservata particolare attenzione allo scopo per cui dovranno essere utilizzate. Infatti la campagna di misure può essere suddivisa essenzialmente in due parti che si differenziano tra loro per le gran-

dezze fisiche finali a cui si vuole arrivare: le misure di pressione mentre da una parte possono essere utilizzate per ricavare una stima dell'impatto d'onda che agisce sulla sponda, dall'altra possono risultare utili per la valutazione di misure significative delle altezze d'onde, attraverso specifici procedimenti analitici.

Grado di innovazione ed impatto applicativo dei risultati

All'interno di uno studio trentennale di Sarretta del 2009 (*Thirty-year changes [1970 to 2000] in bathymetry and sediment texture recorded in the Lagoon of Venice sub-basins, Italy*), è presente una mappa batimetrica della laguna veneta che ha l'obiettivo di far notare l'aumento complessivo della profondità dell'acqua. Tale studio, notevolmente attuale, rientra nell'ambito in cui ha preso vita tale lavoro di tesi e rappresenta, quindi, una prova sostanziale di come i risultati possano essere effettivamente utili per affrontare parte del problema a cui è soggetta, al giorno d'oggi, la laguna di Venezia.

In particolare i risultati ottenuti da questo studio saranno utilizzati in un progetto di ricerca condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale di Firenze in collaborazione col Dipartimento IMAGE dell'Università degli Studi di Padova (Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica) riguardante lo studio dell'arretramento delle barene lagunari. La prerogativa di questa collaborazione è quella di trovare una relazione, attraverso un modello matematico, tra le caratteristiche delle forzanti d'onda e la velocità di erosione delle sponde lagunari, tenendo in considerazione le peculiari proprietà del terreno ed i processi erosivi implicitamente coinvolti. Questa "unione" ha permesso l'organizzazione di una campagna di misure nelle strette vicinanze delle barene lagunari con lo scopo di ricavare delle stime del clima ondoso da affiancare ai già presenti modelli concettuali e numerici riferiti all'azione congiunta del moto ondoso e dell'escursione di marea sulle sponde.

Per questo motivo il lavoro di tesi effettuato avrà notevoli sviluppi futuri ed il sistema di monitoraggio ideato verrà seriamente preso in considerazione nella progettazione della campagna di misure futura, sperando che sia realmente messo in atto, per orgoglio personale.

INGEGNERE IUNIOR

Giulia Volante

TITOLO TESI: *La lana come materiale isolante nell'edilizia*

RELATORE: Arch. Carla Balocco

ABSTRACT

The study developed provided a first phase of knowledge about the material, pure wool, by means of a wide research into many bibliographic sources, as well as an incisive analysis of the measurement criteria and methods of its thermophysical and hygrometric properties. This was associated with a direct experimental field inquiry. This first phase was followed by an evaluation of the energy performances of the material employed for application in construction components. This entailed the evaluation of the thermophysical/energy parameters suggested by the present legislation and provided for in the static/dynamic regime, and also of the acoustic performance of these components. The attainments comparison was also based on the analysis of the energy cost of their realization/maintenance.

Obiettivo

Opportunità, comparazioni, vantaggi e svantaggi sull'utilizzo di lana di pecora come materiale isolante nell'edilizia. Lo studio sviluppato nella tesi ha previsto una prima fase di conoscenza del materiale, lana pura, attraverso una ampia e ricca ricerca su moltissime fonti bibliografiche, nonché un'analisi critica dei criteri e metodi di misura delle sue proprietà termofisiche ed igrometriche, associate ad un'indagine sperimentale diretta sul campo, che ha previsto il confronto con la realtà aziendale e con gli ambienti di ricerca, dalle Università agli Enti di Ricerca. A questa fase è seguita quella di valutazione delle prestazioni energetiche del materiale, impiegato per applicazioni in componenti edili. Ciò ha comportato la valutazione dei parametri termofisici ed

energetici suggeriti dalle attuali normative previsti in regime statico e dinamico, nonché del comportamento acustico di tali componenti. Il confronto dei risultati raggiunti è stato basato anche sulla valutazione del costo energetico della loro realizzazione e manutenzione.

Introduzione

L'ambito con cui mi sono confrontata è quello che vede l'utilizzo della lana di pecora come isolante naturale nell'edilizia. La ricerca ha riguardato una moltitudine di aspetti: un inquadramento dello stato dell'arte della lana, uno studio sulle prime abitazioni in cui si può risalire ad un utilizzo della lana come isolante ed in particolare sulle yurta/ger mongole, una sua collocazione all'interno della categoria di appartenenza nell'ambito dei materiali isolanti per poi scendere gradualmente nel dettaglio, presentando un excursus su quelli che sono temi basilari per lo studio affrontato, ossia: i concetti di sostenibilità energetica, le regolamentazioni per l'edilizia in riferimento all'utilizzo di materiali isolanti ecosostenibili che consentano di ridurre l'impatto ambientale, i consumi di energia e che risultino prestazionali dal punto di vista termofisico, la comparazione tra l'LCA di un pannello in lana di pecora "tipo" e l'LCA di un pannello isolante in lana di pecora esistente e commercializzato dall'Azienda Isolana di Prato confrontando poi questo con i cicli di vita e i fattori di rischio di altri materiali isolanti maggiormente utilizzati oggi in edilizia. Un primo punto di partenza è stato realizzare un approccio diretto sul campo in termini di indagine su come viene prodotta e utilizzata la lana pura, oggetto di studio, e quali sono le

sue possibili applicazioni ad oggi per le aziende del settore in termini economici di vendita, di diffusione del prodotto all'interno del settore edile in funzione della rispondenza a determinati requisiti termofisici ed energetici richiesti dagli edifici e verificando con sopralluoghi in cantiere l'effettiva messa in opera dei prodotti realizzati utilizzando lana di pecora. L'azienda Isolana, in particolar modo, è stata un importante punto di partenza poiché le visite in azienda hanno consentito l'approfondimento delle mie conoscenze sull'argomento di tesi e agevolato la comprensione di quelle tematiche cui si doveva prestare particolare attenzione nella fase successiva, che ha riguardato l'addentrarsi nello studio delle più grandi aziende produttrici di materiali isolanti in lana di pecora attualmente esistenti, al fine di definire: prodotti e relativi cicli produttivi, tipologie di pelo utilizzate per la realizzazione dei loro prodotti, costi dei manufatti finiti e loro possibili applicazioni.

Un approccio diretto di questo tipo si è rivelato molto importante perché ha consentito di comprendere sul campo, in primo luogo, gli sbocchi commerciali e quindi come viene caratterizzato il prodotto, in funzione delle indagini di mercato, delle prestazioni termo-fisiche ed energetiche che devono essere garantite per la normativa sul risparmio energetico e la certificazione energetica degli edifici, ma anche, in secondo luogo, che metodologie e strumenti di misura si utilizzano per definire caratteristiche quali la conducibilità termica, il calore specifico, la permeabilità al vapore, la densità ed infine come si giunge alla certificazione del prodotto. Questi aspetti di ricerca acquistano un ulteriore valore aggiunto, poiché le caratteristiche termo-fisiche, i relativi test e le proprietà della lana sono parametri attualmente difficili da reperire in ambito internazionale, essendo attualmente oggetto di studi sperimentali e ricerche nella letteratura tecnica.

In virtù di ciò mi sono recata a Torino, in primo luogo, per consultare una tesi del Politecnico in cui si presenta un primo studio di indagine sul materiale e in cui vengono sottoposti a prove di isolamento termico dei provini di legno-lana, cemento-lana, gesso-lana e a prove di resistenza a flessione e di resistenza a compressione dei provini costituiti da gesso-lana, cemento-lana, argilla-lana, ed in secondo luogo, per investigare, in forza delle informazioni datemi principalmente dal Prof. Giovanni Canavesio, sul progetto

svolto dal CNR-ISMAL di Biella in collaborazione con il dipartimento DINSE del Politecnico di Torino e la PMI biellese Davifil per quanto concerne un prototipo di parete autoportante realizzato senza l'impiego di resine o fibre sintetiche, che vede come materiale utilizzato la lana di pecora e prende il nome di "Cartonlana"; nonché sul monitoraggio, della durata di almeno un anno, che si sta compiendo al fine sia di valutare le prestazioni del suddetto prototipo al variare delle condizioni climatiche stagionali, sia di verificarne i sistemi di montaggio. Infine, un ultimo aspetto della mia ricerca diretta su campo è stato quello di riferirmi direttamente alle Normative UNI, EN, UNI EN ISO, ISO, per l'argomento trattato per quanto riguarda le prove di resistenza al fuoco, di potere fonoisolante, determinazione del coefficiente di assorbimento acustico, determinazione dello spessore, trasmissione del vapore acqueo, rigidità dinamica, peso specifico, resistenza a trazione, resistenza a flusso d'aria, resistenza agli insetti e determinazione delle emissioni di COV.

A questo punto, avendo raggruppato tutti i dati sull'argomento, il proseguimento dello studio è stato quello di indagare le possibili applicazioni dei prodotti realizzati in lana di pecora su casi di studio reali attraverso una progettazione che faccia riferimento a quelli che sono i criteri di una progettazione consapevole (difatti i benefici dovuti all'adozione di un opportuno materiale isolante sono molteplici: riduzione dei flussi termici entranti nell'edificio in estate ed uscenti in inverno, controllo delle temperature superficiali interne, controllo dei fenomeni di condensa superficiale, riduzione delle fluttuazioni di temperatura in ambienti non climatizzati, etc.) studiando le caratteristiche che influiscono sull'analisi termo-igrometrica con riferimento ad un regime termico stazionario e ad un regime termico variabile, l'assenza del manifestarsi della condensa superficiale e il soddisfacimento di requisiti acustici prestazionali. Specialmente nel caso di refurbishment l'eliminazione di eventuali ponti termici (punti nei quali si ha un abbassamento delle temperature superficiali) è una questione fondamentale ed il conseguimento di ciò può essere effettuato anche andando a prevedere/provvedere mediante un buon isolamento termico dell'involucro, tutto ciò ci consente diversi benefici: l'abbattimento dei costi di riscaldamento, la riduzione delle emissioni di CO₂, la conservazione delle risorse naturali, il mantenimento dell'edificio.

LA LANA COME MATERIALE ISOLANTE NELL'EDILIZIA

SHEEP WOOL AS A BUILDING INSULATION MATERIAL

Questo lavoro di tesi, che mi ha permesso di ottenere il diploma di laurea di primo livello in Scienze dell'Ingegneria Edile, si è sviluppato interfacciando tra loro più contesti: quello universitario, quello aziendale e il cantiere. Il concetto di "sviluppo sostenibile" ossia, quella volontà di garantire lo sviluppo della società e il benessere delle persone ponendo però come limite la capacità dell'ambiente di sostenere tale sviluppo, è stato un tema dall'aspetto rilevante in virtù della sua natura non settoriale che va a coinvolgere ambiti diversi tra loro: quello del territorio, quello urbano, quello del singolo edificio e quello del componente edilizio. Risulta inoltre un concetto, realizzabile nella pratica andando a modificare le fasi di produzione e consumo, promuovendo l'eco-efficienza, rinunciando allo sfruttamento di risorse non rinnovabili, eliminando gli inquinanti, valorizzando i rifiuti attraverso il riutilizzo e fermando la desertificazione.

OBIETTIVO

RISULTATI DEGLI STUDI SUL CICLO DI VITA E FATTORI DI RISCHIO

TABELLA DEGLI IMPATTI	approvvigionamento		produzione				uso		dismissione		
	Consumo di risorse rinnovabili	Consumo di risorse non rinnovabili	Consumo di energia	Riduzione ozono	Effetto serra	Acidificazione	Smog fotochimico	Rischio per gli addetti alla produzione	Nocività nella messa in opera	Nocività in esercizio	Risparmio riciclo (materiale)
Lana di pecora	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Polistirene espanso estruso	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Nessun impatto significativo ○ Impatto elevato
 ● Impatto lieve ○ Impatto molto elevato
 ○ Impatto modesto ○ Impatto elevatissimo

RISULTATI DEGLI STUDI SUL CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA (MJ KG)

MATERIALI ISOLANTI	Reperimento materie prime		Processo produttivo	Involtaggio	Consumo totale
	approvvigionamento	trasporto			
Lana di pecora	0.78	2.64	0.45	0.71	12.09
Polistirene espanso estruso	0.54	2.09	11.95	1.57	167.15

DURABILITÀ PRODOTTI

La durabilità dei prodotti è la loro capacità di mantenere inalterata nel tempo la propria funzione ed efficienza, non richiedendo manutenzione o sostituzione e contribuendo in tal modo a ridurre la produzione stessa dei rifiuti.

Materiali	Durabilità (anni)
Pannello in fibra di legno	50 anni
Materasso in lana di pecora	50-65 anni
Polistirene	prossima illimitata
Panelli di sughero	elevata

Si evince dalla tabella che le durabilità dei prodotti utilizzati per la realizzazione dei sistemi tecnologici presentati, parametro di cui si terrà conto, sono tutte abbastanza alte (almeno un ciclo di vita).

Obiettivo del lavoro svolto è quello di verificare l'efficacia di un materiale ecosostenibile ed ecocompatibile, come la lana di pecora, quale isolante termoacustico confrontandolo con isolanti di origine sintetica e minerale. Il confronto si stabilisce in termini di ciclo di vita e fattori di rischio, di energia inglobata nei materiali, di durabilità dei prodotti, di costo dei prodotti commercializzati, di prestazioni in regime termico stazionario e variabile. Inoltre vengono confrontate le proprietà termofisiche ed acustiche della lana di pecora con quelle degli altri materiali che saranno poi presi in esame per la realizzazione di applicazioni e casi di studio reali; nonché con le proprietà del pannello autoportante in lana di pecora "CARTONLANA". "CARTONLANA" è un progetto di ricerca, i cui campioni sono stati prodotti presso i laboratori dell'ISMAR di Biella e che nasce nell'ambito delle attività di sviluppo sperimentale e industriale promosse da POLIGHT.

POSSIBILI FUTURE APPLICAZIONI: PROTOTIPI

Indanti termoisolanti in lana di pecora. Principali caratteristiche fisiche, tecnologiche ed energetiche	Materassi in agnelli		Cartonlana
	Densità (kg/m³)	15 - 20 - 25	40 - 50
Calore specifico (kJ/kg)	1.3 - 1.7	1.3 - 1.7	
Coeff. di resistenza alla diffusione del vapore (μ)	1 - 5	5 - 6	
Conduttività termica (W/mK)	0.037 - 0.040	0.040 - 0.045	
Classe di reazione al fuoco	I	I	
Mobilità d'opera in opera	Accoppiamento	Sistema mobile, accoppiamento, anatro, emergenza	
Diretta (minuti)	50 - 60	50 - 75	
Moduli di installazione	Isolamento in sottopavimento, isolamento di colmo o sottotetto, accoppiamento	Isolamento esterno, esterno in intercapedine di finestra, verticali, isolamento di sola, sinistri e coperture orizzontali e inclinate	
CEP per kg di prodotto	19.26 (0.03 kg)	21.18 (0.03 kg)	

PROPRIETÀ TERMOFISICHE ED ACUSTICHE DELLA LANA DI PECORA

Caratteristiche	Materasso in lana di pecora
Spessore	3 cm
Massa volumica	50.5 kg/m³
Conduttività termica	0.033 W/mK
Coefficiente di diffusione al vapore acqueo	2.3 μ
Indice di potere fonoisolante	54 dB
Coefficiente di assorbimento acustico perato	0.60 α _w
Capacità termica specifica	1363 J/kgK
Classe di combustibilità	2 oppure B2



APPLICAZIONI POSSIBILI E CASI DI STUDIO REALI

Mediante l'utilizzo di fogli di calcolo è stata sviluppata un'analisi delle soluzioni tecnologiche con riferimento ad un regime termico stazionario e variabile.

L'analisi ha riguardato gli edifici esistenti e la nuova costruzione. Per le applicazioni su casi di studio reali di edifici esistenti si è intervenuto andando a realizzare dei cappotti esterni e dei cappotti interni costituiti da diverse soluzioni tecnologiche confrontate successivamente fra loro in termini di prestazioni.

- Per il cappotto esterno le tre soluzioni adottate, sulle pareti di riferimento delle due tipologie edilizie toscane degli anni successivi al 1950 della Norma UNI/TS 11300-1:2008 allegato A, vedono l'utilizzo di: pannelli in fibra di legno - Pavatex -, pannelli in polistirene - Knauf -, materassini in lana di pecora e lastra Aquapanel Outdoor - Edilana, Knauf.

- Per il cappotto interno del fienile sito in San Casciano in Val di Pesa, sono state adottate due soluzioni tecnologiche che vedono nella prima soluzione l'utilizzo di materassini in lana di pecora e tavolati in legno di abete - Daemwool - e nella seconda soluzione l'utilizzo di lana di roccia e lastra Aquapanel Indoor - Knauf - Infine, per quanto concerne la nuova costruzione mi sono riferita alla realizzazione della nuova ala dell'edificio esistente "AIA", di proprietà della Coverd, per il quale si ha l'utilizzo sinergico di sughero biondo naturale e lana di pecora che verrà confrontato con la parete "light wall" realizzata interamente con prodotti Knauf.



APPLICAZIONI SU CASI DI STUDIO REALI: TAMPONAMENTI VERTICALI OPACHI



Per ogni soluzione tecnologica adottata sono stati rispettati i seguenti limiti imposti da normativa:

Parametro di riferimento	Normativa	Limite parametro
Trasmittanza U	UNI EN 10351	< 0.29 W/m²K, zona climatica D
Trasmittanza termica periodica Y _e	D.P.R. 59/2009	< 0.21 W/m²K
Serramento	UNI EN ISO 13786	S > 12 h, ottima, classe I
Fattore di decremento	UNI EN ISO 13786	F _a > 0.15, ottima, classe I
Potere fonoisolante ideale	DECM 5/12/1997	R _w > 50 dB

Nei sistemi tecnologici sono stati utilizzati prodotti realmente esistenti, così da poter confrontare le soluzioni in termini di prestazioni energetiche e costi, una volta garantita l'assenza di condensa e il rispetto dei limiti imposti dalle norme.

RISULTATI / BENEFICI

Attraverso lo studio sviluppato in termini di indagini sulle aziende, le università e gli istituti di ricerca si è evinto che la lana possiede: una buona capacità termica, buone proprietà termofisiche, buone prestazioni acustiche, capacità di assorbire umidità in quantità considerevoli, buona stabilità dimensionale, l'ecolabeling del materiale, basso consumo di energia per la produzione e corta catena di produzione, assenza di problemi per la fase d'uso, è una materia prima rigenerabile, è riciclabile.

Inoltre a seguito dello studio compiuto in termini di applicazioni si è evidenziata l'effettiva limitazione delle suddette per la realizzazione di sistemi sul costruito in cui il rapporto costi/benefici non è risultato soddisfacente contrariamente a quanto accade per le nuove realizzazioni, per le quali all'elevato costo si riesce a sopperire con il raggiungimento di standard termoacustici elevati.

Pertanto un primo passo da poter sicuramente compiere per consentire prospettive future di miglioramento e ampliamento nell'utilizzo di questo materiale, è quello dell'abbattimento dei costi andando a sfruttare la sovrapproduzione laniera locale, consentendo ad un materiale dalle grandi potenzialità considerato, oggi giorno, come un rifiuto di divenire una risorsa.

CONCLUSIONI

INTERVENTO DI REFURBISHMENT/NUOVA COSTRUZIONE

Sceita del sistema tecnologico → analisi edificio/impianto e analisi costi/benefici

Interventi su edifici esistenti/refurbishment per civile abitazione:

- Utilizzo di materiali minerali/sintetici
- Cappotto esterno
- Limitazione dei consumi
- Costi contenuti
- Buoni livelli di standard termoacustici

Nuova costruzione:

Utilizzo di materiali ecosostenibili a basso impatto ambientale

Ammortizzamento del dispendio energetico

Ulteriore riduzione dell'impatto mediante il finanziamento dell'impianto

Costi elevati

Elevati standard termoacustici



◀ Fig. 1 - Mensa Istituto Comprensivo Lorenzo Bartolini, Vaiano
Isolamento acustico con baffles di lana di pecora della ditta edilana

La valutazione fatta ha riguardato soluzioni tecnologiche diverse in termini sia di origine dei materiali isolanti adottati per la loro realizzazione, sia di posizionamento rispetto all'edificio, sia, infine, in termini di realizzazione vera e propria nel caso in cui ci si trovi dinanzi ad edifici esistenti, quindi con interventi di refurbishment, e/o a nuove costruzioni. Inoltre, tenendo conto del fatto che la valutazione di un isolante non si basa unicamente sui benefici che questo apporta nel periodo di riscaldamento ma anche sulle prestazioni espletate nel periodo estivo, risulta evidente che per poter ottenere un'attendibile analisi dei dati si è dovuto tener conto, oltre che della conducibilità, anche di altri parametri che rivestono in quest'ottica dei ruoli molto importanti, quali ad esempio: la massa volumica e il calore specifico.

Per quanto riguarda la possibilità di aver fatto riferimento a sistemi tecnologici posizionati in modi diversi rispetto all'edificio stesso, questo è stato reso possibile dal fatto che oggi vi è la disponibilità di avere diversi sistemi e diversi materiali isolanti, il che ci consente di intervenire nelle più svariate tipologie edilizie.

È possibile, infatti, pensare di isolare un fabbricato intervenendo dall'esterno con sistemi "a cappotto", utilizzando dell'isolante in intercapedine o intervenendo dall'interno.

Scendendo più nel dettaglio si evince che: isolare un fabbricato dall'interno è una pratica alla quale si dovrebbe ricorrere solo in casi di riqualificazione energetica di edifici soggetti a particolari vincoli sull'estetica della facciata o in risposta a specifiche norme tecniche comunali; inoltre per questo sistema

d'isolamento, essendo soggetto a fenomeni di condensazione interstiziale, in relazione alla propria conformazione e caratteristica igrometrica, è indispensabile l'utilizzo della barriera al vapore per evitare problemi di umidità nei componenti dell'involucro degli edifici; l'utilizzo di materiale isolante all'interno di intercapedine in pareti con doppio paramento murario (a cassa vuota) è una soluzione costruttiva che vede in Italia un'ampia diffusione, ma se, da un lato, questo sistema ha il vantaggio di mantenere lo strato di isolante in condizioni riparate, è però, dall'altro, maggiormente soggetto alla presenza di ponti termici lineari (travi di bordo e pilastri) che possono interrompere la continuità dell'isolante, quindi per ridurre l'incidenza della discontinuità della coibentazione diventa indispensabile un'attenta progettazione ed esecuzione dei nodi costruttivi; per quanto riguarda, invece, l'isolamento esterno l'esperienza ci insegna che risulta essere il miglior metodo per la risoluzione dei ponti termici. L'isolamento dall'esterno, "a cappotto", consiste nel rivestire dall'esterno le pareti riducendo drasticamente l'incidenza dei possibili ponti termici grazie all'uniformità e continuità dello strato isolante. Nelle costruzioni a scheletro in calcestruzzo tipiche degli anni '60 e '70 con elementi di facciata a cortina talvolta danneggiati per l'azione di agenti atmosferici succede che lo strato di isolante interno, quando presente, è spesso bagnato e quasi inefficace ed il risanamento di una facciata di questo tipo è paragonabile alla costruzione di un edificio ex novo poiché ciò che si mantiene è solo lo scheletro.

In virtù di queste considerazioni, le scelte perseguite nel mio studio sono state quelle di intervenire: con un "cappotto" esterno su edifici esistenti che abbiano le pareti assimilabili a quelle della norma UNI/TS 11300-1:2008 Allegato A, con un isolamento dall'interno su un edificio esistente sito in San Casciano Val di Pesa e con soluzioni innovative nel caso di nuova realizzazione della nuova ala dell'edificio AIA di proprietà della Coverd. Si è tenuto conto anche del fatto che l'isolamento esterno rallenta il riscaldamento e il raffreddamento degli ambienti ed è consigliato per ambienti riscaldati con interruzione notturna (è quindi maggiormente indicato negli edifici aventi esercizio continuativo, in cui durante il funzionamen-

to dell'impianto di riscaldamento si hanno un notevole accumulo di calore nelle pareti e il rilascio nelle ore notturne di questo calore accumulato, con riscaldamento spento, migliorando notevolmente il comfort termico), mentre l'isolamento interno accelera il riscaldamento e il raffreddamento degli ambienti e risulta maggiormente indicato negli edifici aventi esercizio discontinuo (come, per esempio, le seconde case o uffici, ossia in quegli ambienti riscaldati saltuariamente e che devono essere riscaldati/raffreddati rapidamente).

Metodo

L'approccio proposto si basa su di una metodologia che integra e correla alcune fasi fondamentali:

- Ricerca su fonti di letteratura e bibliografiche, e quindi analisi critica e comparativa (eventualmente su basi statistiche) dei dati raccolti;
- Ricerca diretta empirica e sperimentale su campo in merito a metodi/criteri di misura e strumenti utilizzati (misure statiche e in regime dinamico) per definire le caratteristiche termo-fisiche igrometriche, acustiche e strutturali del materiale e/o componente edile;
- Confronto e analisi statistica dei dati empirici raccolti e delle evidenze sperimentali di letteratura;
- Indagine di mercato inerente alle aziende produttrici del materiale/componente e settori edili di applicazione ed utilizzazione;
- Calcolo degli indici di prestazione (termo-fisica) in regime stazionario e transitorio e degli indici di prestazione acustica;
- Calcolo dei parametri suggeriti dalla normativa vigente inerenti ai requisiti termici, igrometrici ed acustici;
- Confronto tra i valori degli indicatori ottenuti;
- Valutazione delle prestazioni energetiche in rapporto alle potenzialità di applicazione e al costo energetico, oltre che monetario, dovuto.

Il metodo proposto può essere quindi più dettagliatamente spiegato. La prima fase è fondamentale perché concerne i materiali e metodi (significa ricerca dei dati, ricerca direttamente su campo, eventualmente indagine sperimentale indiretta), segue quin-

di uno studio diretto e applicato di un componente edile, di un materiale isolante innovativo e poco conosciuto proponendo un metodo, una metodologia integrata di analisi, che parte (in prima istanza) da sintesi delle evidenze scientifiche e sperimentali fino ad oggi presenti (ricerca su letteratura nazionale e internazionale, aziende, tesi sperimentali, enti di ricerca), (in seconda istanza) da indagini dirette su campo e studi sperimentali indiretti al fine di riuscire a capire quali sono i criteri necessari per l'identificazione di ciò che ci serve del materiale, (in terza istanza) si procede stabilendo ed indicando quale sia il metodo migliore, quali sono gli strumenti utilizzati per testare le proprietà che appartengono al materiale in relazione ai parametri di legge, quanto realmente può servire il materiale oggetto di analisi, quanto costa e quale è la funzionalità fino ad arrivare alla certificazione del materiale stesso, ed in ultima istanza ci si occupa dell'individuazione e della definizione delle caratteristiche termo-fisiche del materiale dal punto di vista termico, acustico ed igrometrico nonché strutturale. Il metodo proposto permette dunque di valutare le applicazioni fattibili e realizzabili, attraverso il confronto delle prestazioni termo-fisiche ed energetiche del componente studiato con altri componenti molto diffusi, attualmente utilizzati sul mercato e pertanto altamente competitivi e con buone prestazioni dal punto di vista termico ed acustico.

Questo approccio metodologico e di indagine può essere uno strumento utile proprio per identificare le prestazioni termo-fisiche ed energetiche di materiali e di componenti edili, in modo particolare di quelli definiti genericamente "ecosostenibili" (riciclati, or-



► Fig. 2 – Foto cantiere San Casciano in Val di Pesa
Posa in parete verticale di materassini in lana di pecora Daemwool DWS10

ganico derivati...) le cui caratteristiche e proprietà non sono ben note in letteratura e per i quali risulta difficile stabilire se ed a quali vantaggi possono condurci. L'importanza di questo approccio metodologico consiste nel fatto che il sistema logico di indagine e valutazione può essere estendibile a qualsiasi materiale, ma anche ulteriormente sviluppabile ed ampliabile in funzione dello stesso oggetto di analisi e quindi con la potenzialità di risultare auto-migliorante.

Risultati raggiunti

Nello studio eseguito sono stati determinati, mediante un metodo semplificato derivato dall'applicazione delle UNI, con semplici fogli di calcolo, i parametri utilizzati nei calcoli del fabbisogno energetico degli edifici per il riscaldamento/valutazione dell'attitudine dell'involucro edilizio a smorzare e ritardare le sollecitazioni termiche esterne estive; in accordo con la norma UNI EN ISO 13786 si è intervenuti sulle pareti perimetrali verticali in modo da riportare i valori entro i limiti di legge ed in particolare ricorrendo ad un isolamento a cappotto esterno realizzato con l'utilizzo distinto di tre diversi materiali aventi costi a m² sostenibili: fibra di legno, polistirene e lana di pecora. Le prestazioni dei tre siste-



mi sono poi state confrontate/comparate tra loro. Per la realizzazione di ognuno di questi sistemi sono stati utilizzati prodotti realmente esistenti, al fine di poter confrontare tra loro le diverse soluzioni in termini di prestazioni energetiche e di costi, una volta garantito il rispetto dei limiti imposti dalle normative UNI EN 10351, D.P.R. 59/2009, UNI EN ISO 13786, PCM 5/12/1997 e l'assenza di condensa UNI EN ISO 13788:2003.

La prima analisi condotta ha riguardato la realizzazione del cappotto esterno per il quale sono stati utilizzati/confrontati: legno della ditta Pavatex, polistirene Polyfoam C-Ultragrip SE prodotto dalla Knauf e materassini in lana di pecora Edilana Mat3”D50” rivestiti con lastra Aquapanel Outdoor della ditta Knauf. Dopo aver estrapolato ed analizzato i dati dei fogli di calcolo relativi alle soluzioni sopraelencate ed aver rispettato i limiti di legge per ognuna delle pareti esaminate, è emerso che: quello che possiede il più basso valore di conducibilità termica è il Mat3”D50” con una conducibilità termica $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$; quello che ha fornito alla parete in esame la migliore attenuazione delle onde termiche è risultato il pannello Diffutherm Fa = 0.037; per quanto riguarda la lentezza con cui la sollecitazione termica attraversa i vari strati della parete e l'accumulo termico è risultata migliore la parete cui è stato applicato il rivestimento Diffutherm con un valore di capacità termica areica CIP = $558 \text{ J/m}^2\text{K}$ e uno sfasamento di 19.31 h; infine per quanto riguarda la trasmittanza termica, la parete con la più alta capacità isolante è risultata quella con il cappotto in lana di pecora avente $U = 0.239 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La seconda analisi condotta ha riguardato la realizzazione di un isolamento dall'interno per edifici esistenti ed in questo caso sono state usate due soluzioni tecnologiche: materassini in lana di pecora Daemwool DWS10 e tavolati in legno di abete, lana di roccia e lastra Aquapanel Indoor. Rispettati i limiti di legge per entrambe le soluzioni, è emerso dal confronto che tra i materiali utilizzati quello che è risultato avere il più basso valore di conducibilità termica è il DWS10 con una $\lambda = 0.030 \text{ W/mK}$, quello che invece ha fornito alla parete in esame la migliore qualità di attenuazione delle onde termiche è risultato essere il rivestimento in lana di roccia ISOROC CIA110 Fa = 0.069, migliore

◀ Fig. 3 - Foto cantiere San Casciano in Val di Pesa Materassino lana Daemwool DWS 10

anche per quanto riguarda lo sfasamento di 14.00 h e per trasmittanza termica $U = 0.250 \text{ W/m}^2\text{K}$. Infine anche per quanto concerne le proprietà di isolamento acustico della parete, quella con maggiore potere fonoisolante è quella con il rivestimento ISOROC-CIA110: $R_w = 54.22 \text{ dB}$.

Per quanto riguarda l'estate, invece, si ha che: la struttura rivestita in lana di roccia possiede un valore di sfasamento pari a 14.00 h, uno spessore complessivo della parete di 44.75 cm e costo a m^2 di € 59.81 mentre la struttura rivestita con DWS10 e tavolato in legno di abete ha un valore di sfasamento pari a 12.38 h, spessore complessivo di 46.50 cm e costo al m^2 di € 26.68, pertanto in questo caso, considerando sia la differenza di prezzo che il consumo di energia primaria, potrebbe risultare conveniente utilizzare come sistema di isolamento per questa struttura quello realizzato accoppiando i tavolati in legno di abete al materassino in lana di pecora. La terza ed ultima analisi condotta è quella che ha dato risultati maggiormente soddisfacenti, riguarda la realizzazione delle pareti della nuova ala dell'edificio AIA, adottando due soluzioni tecnologiche biocompatibilmente opposte tra loro: una vede l'utilizzo sinergico di sughero biondo naturale e lana di pecora (ed è quella realmente utilizzata), mentre nell'altra si ipotizza l'utilizzo di una parete altamente performante: la parete "light wall" realizzata con prodotti Knauf. Anche in quest'ultima analisi, come accadeva per le altre, entrambe le soluzioni proposte rispettano i limiti di legge in regime stazionario e periodico. Tra i materiali utilizzati quello con più basso valore di conducibilità termica è il materassino in lana di pecora "Lankot", $\lambda = 0.037 \text{ W/mK}$, il sistema che vede l'adozione di lana e sughero è quello che possiede anche la migliore qualità di attenuazione $F_a=0.037$, il miglior valore di capacità termica areica $CIP = 299 \text{ J/m}^2\text{K}$, il miglior sfasamento pari a 17.00 h, la miglior trasmittanza termica con $U = 0.200 \text{ W/m}^2\text{K}$ ed anche la parete con maggiore potere fonoisolante: $R_w = 53.77 \text{ dB}$. Confrontando in termini di costo e spessore complessivo i due sistemi tecnologici, si ha che: la parete

realizzata con sughero biondo naturale e materassino in lana di pecora ha un valore di trasmittanza termica $U = 0.200 \text{ W/m}^2\text{K}$, sfasamento pari a 17.00 h e spessore complessivo della parete di 41.60 cm ad un costo a m^2 di € 71.70, la parete realizzata con prodotti Knauf ha invece un valore di trasmittanza termica $U = 0.288 \text{ W/m}^2\text{K}$, sfasamento di 8.56 h, spessore complessivo della parete di 30.61 cm e costo a m^2 di € 79.75. Risulta evidente come la scelta tra queste due strutture ricada, sia in termini di prestazioni estive ed invernali, sia in termini di costo che in termini di impatto ambientale (essendo questa composta prettamente da materiali naturali, ecosostenibili e riciclabili e l'altra da materiali di origine sintetica e minerale) su una tipologia di parete come quella realizzata nell'AIA piuttosto che su di una parete del tipo Knauf. Inoltre, l'applicazione della lana come materiale isolante è risultata capace di garantire benefici maggiori rispetto alle altre soluzioni tecnologiche in termini di: riduzione dell'inquinamento con il recupero di un materiale considerato di scarto come la lana, utilizzo di un materiale isolante con corta filiera di produzione nonché sostenibile, recupero della CO_2 emessa per la produzione.

Conclusioni

Al termine dell'analisi è risultato che la lana possiede una buona capacità termica, buone proprietà termofisiche, buone prestazioni acustiche, capacità di assorbire umidità in quantità considerevoli, buona stabilità dimensionale, l'ecolabeling del materiale, basso consumo di energia per la produzione e corta catena di produzione, assenza di problemi per la fase d'uso, è una materia prima rigenerabile e riciclabile. Per quanto riguarda le applicazioni, lo studio condotto mette in luce l'effettiva limitazione per quanto concerne la realizzazione di sistemi sul costruito in virtù del risultato poco soddisfacente del rapporto costi/benefici, al contrario di quanto emerso in riferimento alle nuove realizzazioni ove si riesce a sopperire al costo della realizzazione del sistema con il raggiungimento di elevati standard termoacustici.

INGEGNERE

Francesco Socci

TITOLO TESI: *Profili di acciaio in parete sottile soggetti a sforzo normale eccentrico. Analisi non lineare agli elementi finiti ed esempio applicativo*

RELATORI: Prof. Ing. Maurizio Orlando - Prof. Ing. Ostilio Spadaccini
Ing. Giovanni Lavacchini - Ing. Barbara Ortolani

1. Inquadramento del tema trattato e del lavoro svolto

Il presente lavoro si colloca nell'ambito degli studi volti a fornire un'interpretazione del comportamento strutturale dei profili di acciaio in parete sottile formati a freddo.

Il lavoro ha riguardato lo studio dei suddetti profili di acciaio soggetti a sforzo normale eccentrico tramite analisi non lineari agli elementi finiti.

L'analisi si è basata su dati ottenuti da prove sperimentali effettuate all'interno del laboratorio dell'azienda ROSS S.p.A. È stato realizzato un modello numerico in grado di analizzare il comportamento del profilo durante le diverse prove, in pressoflessione sia retta che deviata. Il modello numerico è stato in grado di simulare le prove sperimentali sia come carico ultimo che come curva carico-spostamento. Il modello si è dimostrato efficace anche nell'analisi delle varie forme di instabilità al collasso del profilo.

L'ultima parte del lavoro ha riguardato la modellazione agli elementi finiti di una struttura autoportante porta pallet. La struttura presa in esame è realizzata tramite profili di acciaio in parete sottile formati a freddo, oggetto di studio della tesi. La struttura è stata sottoposta ai carichi verticali ed all'azione del vento analizzandone il comportamento strutturale con verifiche allo stato limite di esercizio e stato limite ultimo.

2. Analisi delle caratteristiche dei profili sottili formati a freddo

Nella prima parte del lavoro sono state analizzate le caratteristiche dei profili di acciaio in parete sottile formati a freddo, in particolare le loro caratteristiche fisiche, le forme e tipologie, le tecniche di formatura ed il loro comportamento strutturale.

Nello specifico è stato riscontrato come i profili di acciaio prodotti industrialmente presentino inevitabilmente imperfezioni nella sezione (di tipo meccanico e geometrico) e su tutta la lunghezza causate dal processo di produzione.

Sono stati descritti i fenomeni di instabilità locale, distorsionale e globale caratterizzanti il comportamento di tali profili riscontrando come la sovrapposizione tra i modi di instabilità locale e globale sia di fondamentale importanza nella comprensione del loro comportamento. Dato che le sezioni formate a freddo sono generalmente sottili e aperte, l'instabilità flessione-torsionale può rappresentare il fenomeno critico.

3. Analisi delle prove sperimentali

Sono state analizzate le prove sperimentali in compressione semplice, in pressoflessione retta e in pressoflessione deviata effettuate su provini della serie 130/250.

Le eccentricità di carico hanno interessato i due assi principali del profilo per un totale di 5 prove in

pressoflessione retta e 2 prove in pressoflessione deviata.

L'analisi delle caratteristiche fisiche della macchina di prova è stata di fondamentale importanza nella fase di modellazione numerica permettendo di modellare in maniera dettagliata gli elementi distintivi.

Le caratteristiche della prova sperimentale (preparazione provino, macchina di prova, condizioni al contorno e misurazioni) sono state descritte in modo dettagliato all'interno del lavoro di tesi.

Le prove sperimentali hanno permesso di definire, per ogni eccentricità:

- Curva carico-spostamento;
- Carico al collasso;
- Forme di instabilità al collasso e valutazione a step successivi durante la prova.

4. Modellazione numerica ed analisi non lineare

Il profilo oggetto delle prove sperimentali è stato modellato agli elementi finiti tramite il codice di calcolo *DIANA*. Il risultato è stato il frutto di diverse fasi che hanno riguardato la scelta della discretizzazione ottimale, le condizioni al contorno etc.

L'obiettivo era quello di realizzare un modello numerico che abbinasse, ad un ridotto onere computazionale, la capacità di cogliere tutti i fenomeni di instabilità che hanno caratterizzato il comportamento di tali profili nelle prove sperimentali.

Nelle immagini seguenti viene mostrato il modello numerico nel suo sviluppo globale; è possibile osservare la particolare attenzione rivolta alla definizione

del reticolo intorno alle forature. Lo studio approfondito della discretizzazione ottimale da utilizzare per le analisi non lineari ha permesso di avere due sostanziali benefici:

- Diminuzione del tempo di analisi del 30%;
- Analisi delle plasticizzazioni locali (plasticizzazione dei fori).

La macchina di prova è caratterizzata dall'utilizzo di una sagoma e una controsagoma per l'alloggiamento del provino. Questo tipo di elemento distintivo fa sì che in corrispondenza dell'interfaccia fra elemento e piastra di estremità gli spostamenti nel piano e le rotazioni del provino siano vincolati a quelli delle piastre alle quali sono collegati. In realtà la parte di profilo all'interno della piastra è vincolata nel piano ma può sollevarsi, non avendo vincoli allo spostamento verticale.

Il provino non è solidale alla piastra di alloggiamento in quanto la piastra stessa produce un vincolo alla sola compressione (vincolo monolatero). Quest'ultima condizione al contorno è di particolare rilevanza nel caso delle prove in pressoflessione dove la sezione di base si parzializza e quindi la parte del provino che risulta in trazione si solleva dalla piastra di alloggiamento. Per modellare questa caratteristica sono state utilizzate delle particolari molle alle quali è possibile associare una massima ed una minima forza ammissibile. È stata definita una forza ammissibile di compressione molto elevata in modo da rendere la

▼ Fig. 1 - Foto delle forme di instabilità al collasso dei provini nelle varie configurazioni di carico



molla infinitamente rigida a compressione e una forza ammissibile di trazione molto ridotta; in questo modo nel momento in cui la base del provino si parzializza, durante un qualsiasi step di carico, le molle presenti nella parte in trazione si disattivano permettendo il sollevamento del profilo dalle piastre di alloggiamento.

Una volta definito il modello numerico, sono state condotte diverse tipologie di analisi, utilizzando il codice di calcolo *DIANA*.

Analisi lineari

L'analisi lineare ha consentito di confrontare (anche se in campo lineare) le forme di instabilità ricavate sperimentalmente con quelle del modello numerico e di correggere eventuali errori nella modellazione.

Analisi di stabilità lineari

L'analisi di stabilità è stata effettuata applicando al modello numerico le varie eccentricità sperimentali. In tutti i modelli il primo modo di instabilità è risultato compatibile con le prove sperimentali evidenziando uno sbandamento maggiore nell'ala di destra del profilo rispetto a quella di sinistra. I risultati ottenuti sono stati utilizzati per un primo confronto (anche se in campo lineare) con le prove sperimentali e per eseguire un controllo sulla modellazione del profilo, in modo da affrontare le successive analisi in campo non lineare con un modello funzionante in campo lineare.

A titolo esplicativo si riportano alcune immagini del modello.

Analisi non lineari

Sono state condotte analisi non lineari di tipo geometrico e fisico introducendo nel modello caratteristiche come le imperfezioni iniziali, il comporta-

mento plastico del materiale e la risposta in regime di grandi spostamenti. Inoltre, utilizzando un'analisi in controllo di spostamento, è stato possibile descrivere il comportamento post-critico dell'elemento.

Uno degli obiettivi dell'analisi non lineare era quello di trovare un carico di collasso con una differenza minore del 6-8% rispetto al carico risultante dalla campagna sperimentale.

L'analisi non lineare ha permesso di valutare, oltre al carico critico, il comportamento del profilo durante gli step di spostamento fino alla forma di instabilità al collasso.

Nelle immagini seguenti si mettono a confronto alcune forme di instabilità ricavate dal modello numerico con le forme di instabilità ricavate sperimentalmente.

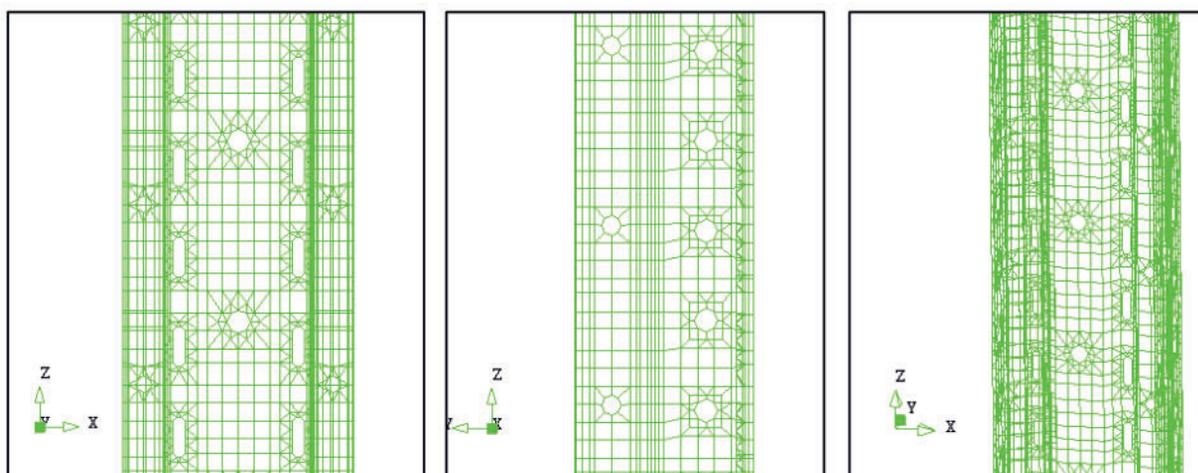
È possibile notare che le forme di instabilità tra modello numerico e prova sperimentale sono pressoché identiche, si riescono a identificare con precisione le parti del profilo instabilizzate, il comportamento distorsionale, globale e locale oltre alle zone plasticizzate.

Il confronto con i risultati sperimentali è stato fatto anche in termini di carico ultimo.

A conferma dell'efficacia della modellazione e delle analisi non lineari, la differenza tra i valori di carichi ultimi ricavati sperimentalmente e quelli ottenuti dalla modellazione è all'interno dell'intervallo 1-3%.

In ultima fase sono state confrontate le curve carico-spostamento sperimentali e le curve ricavate dal modello numerico. Il confronto è stato fatto alla luce di alcune considerazioni sulle prove di laboratorio per comprendere appieno le differenze e le analogie.

▼ Fig. 2 - Vista frontale - laterale e tridimensionale del modello numerico



Le caratteristiche della prova in laboratorio che modificano in modo sostanziale la curva carico-spostamento sono le seguenti:

- Il provino all'interno delle piastre di alloggiamento ha degli assestamenti soprattutto nella parte iniziale della prova.
- La prova di laboratorio viene effettuata in controllo di carico, al contrario dell'analisi numerica, realizzata in controllo di spostamento. L'utilizzo del controllo di spostamento ha permesso l'analisi della parte softening della curva carico-spostamento nel modello numerico.

Nel confronto tra le curve numeriche e sperimentali possiamo notare che:

- La parte iniziale delle curve sperimentali risulta non lineare in quanto il provino ha un assestamento all'interno delle piastre di alloggiamento nei primi step di carico.
- Dopo la zona di assestamento la parte lineare è molto simile tra le due curve, infatti risultano quasi parallele.

Come spiegato nelle pagine seguenti, per la costruzione del dominio N-Mx e N-My al collasso, è stato necessario analizzare il modello numerico con molte altre eccentricità, in modo da costruire il dominio resistente reale.

5. Costruzione dei domini di resistenza

È stato costruito il dominio di resistenza nel piano N-M del profilo di acciaio formato a freddo, oggetto di studio, secondo le trattazioni proposte dalle norme UNI EN 15512 e UNI EN 1993. Successivamente sono stati confrontati i domini di resistenza di normativa con quelli ricavati dal modello numerico realizzato con *DIANA*.

In pratica, una volta definita la lunghezza e l'eccentricità dello sforzo normale alle estremità del montante, facendo variare l'azione di compressione, si identifica quel valore del momento flettente per il quale la verifica risulta soddisfatta all'unità.

Il confronto tra le due trattazioni ha previsto la realizzazione di un grafico cartesiano nel quale sull'asse delle ascisse troviamo il valore dello sforzo normale e sull'asse delle ordinate il valore del momento flettente. Su di esso sono stati sovrapposti i domini di resistenza, come mostrato nell'immagine seguente.

Come si evince dalle immagini, i domini costruiti secondo l'EC3 e secondo la norma UNI EN 15512 sono

molto simili tra loro. Considerazioni più approfondite sono state fatte all'interno del lavoro di tesi analizzando le differenze tra i parametri normativi utilizzati e la loro influenza all'interno delle formulazioni.

Tramite il modello numerico realizzato si è provveduto ad analizzare altre eccentricità, oltre a quelle delle prove sperimentali, in modo da ricavare i domini al collasso reali del profilo. Ricavando il carico al collasso dalle curve carico-spostamento, è stato possibile calcolare il momento flettente moltiplicando il carico per le varie eccentricità modellate.

Questo ha permesso di confrontare i domini di resistenza ricavati dalle normative con quelli ricavati dal modello numerico.

Nel piano cartesiano N-My sono presenti due domini di resistenza in quanto il comportamento del profilo, nel caso di eccentricità su parte irrigidita o parte non irrigidita, è sostanzialmente diverso. I domini sono stati adimensionalizzati al valore di $N_{rd,Elastico}$ e $M_{rd,Elastico}$.

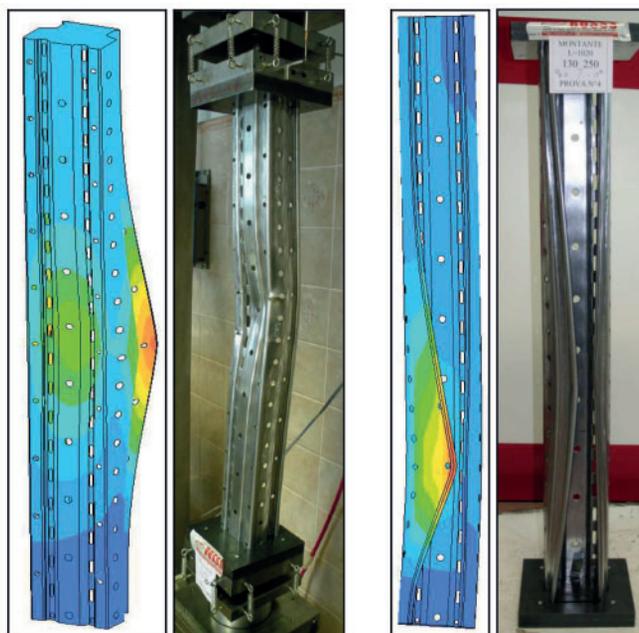
Per tutte le coppie di valori ricavate dal modello numerico è stato calcolato lo scostamento massimo, sulla retta di eccentricità costante, dalla frontiera dei domini di normativa.

6. Modellazione e verifica di struttura autoportante porta pallet

L'edificio analizzato è una struttura autoportante porta pallet che presenta un pianta rettangolare di lunghezza pari a 66 m e larghezza 12 m, per un'altezza di circa 23 m.

Trattandosi di magazzino automatico sulla pianta è possibile identificare due corridoi centrali che consentono la corsa del traslo elevatore, e otto scaffalature porta pallet ubicate a sinistra e a destra dei suddetti corridoi. La scaffalatura porta pallet di questa struttura si ottiene assemblando due soli elementi fondamentali, spalle e correnti, mediante semplice incastro e senza ricorso a bulloni, giunti o altri componenti. Le spalle sono gli elementi verticali della struttura e sono formate da montanti, diagonali e traversi; i correnti sono gli elementi orizzontali e presentano una sezione rettangolare chiusa, costituendo l'appoggio dei pallet.

- Peso proprio della struttura: tale valore è stato automaticamente calcolato dal codice di calcolo.
- Peso proprio medio del pallet: fornito dall'utilizzatore.



◀ Fig. 3 – Immagini di confronto tra le forme di instabilità al collasso delle prove sperimentali e quelle ricavate dal modello numerico

Il confronto con i risultati sperimentali è stato fatto in termini di carico ultimo P_{cr} , di forme di instabilità e di curva carico-spostamento. Le differenze osservate tra i valori di carichi ultimi ricavati sperimentalmente e quelli ottenuti dalla modellazione sono comprese nell'intervallo 1-3%.

- Forze equivalenti da imperfezione degli elementi della struttura: sistema di forze statiche equivalenti che tengono opportunamente conto delle imperfezioni di oscillazione del telaio.
- Carico della neve.
- Carico del vento: separando gli effetti derivanti dal vento di trascinamento concomitante con l'azione del vento diretta. Entrambi sono stati definiti per le due direzioni principali della struttura (longitudinale e trasversale).

Per quanto riguarda il controllo degli spostamenti (SLE), sono state condotte due tipologie di verifiche, secondo la norma NTC 2008 e secondo la norma UNI EN 15620.

Sono state calcolate le sollecitazioni massime (SLU) tenendo conto delle combinazioni tra carico del vento, carico neve e carichi di esercizio. Con le sollecitazioni massime sono stati verificati gli elementi strutturali principali secondo quanto indicato nella norma UNI EN 15512, integrandola con le raccomandazioni dell'EC3.

7. Innovazione e applicazione dei risultati ottenuti – Rilevanza scientifica

Il modello numerico realizzato è in grado di simulare il comportamento non lineare del profilo di acciaio in parete sottile oggetto di studio. È stata confermata l'importanza delle fasi di modellazione che potranno essere adottate per le eventuali successive analisi di altri profili di questa tipologia.

- Il confronto tra i domini di resistenza da normativa e quelli ricavati dal modello numerico ha permesso di evidenziare una differenza sostanziale soprattutto nel caso di momento flettente agente sull'asse di simmetria. In questo caso la variazione tra la frontiera del dominio di normativa e quello numerico è in media del 40% a favore di sicurezza. Esiste quindi una parte di dominio molto ampia non considerata nelle formulazioni di normativa. Sollecitando il profilo con momento flettente agente sull'asse perpendicolare a quello di simmetria, la differenza tra la frontiera del dominio di normativa e quello numerico è in media del 10%. In questo caso la normativa riesce ad approssimare in modo efficace il dominio resistente del profilo fino a eccentricità di circa 200mm, dopo la quale risulta a sfavore di sicurezza. Tramite questi confronti si è dimostrata la differenza tra il comportamento reale del profilo e il limite imposto dalle formulazioni da normativa.

- Durante le analisi effettuate con il modello numerico è stato possibile individuare, all'interno del dominio di resistenza, le varie eccentricità che manifestano forme di instabilità al collasso paragonabili. L'individuazione di zone all'interno del dominio nelle quali il profilo ha un comportamento simile è molto importante perché permette di comprendere come le varie forme di instabilità al collasso variano al variare dell'eccentricità applicata al profilo.

Lo studio del comportamento di elementi di acciaio in parete sottile risulta essere di estrema attualità soprattutto in seguito agli eventi sismici avvenuti in Emilia Romagna nel 2011, nei quali ci sono stati crolli di strutture autoportanti realizzate con questa tipologia di profili.

INGEGNERE

Salvatore Giambona

TITOLO TESI: *Analisi e ottimizzazione dei tempi di percorrenza di una linea tramviaria. “Applicazione alla Linea T1 Firenze - Scandicci”*

RELATORI: Prof. Ing. Salerno Giorgio - Prof. Ing. Lorenzo Domenichini

CORRELATORE: Dott. Bartolini Luca

IL LAVORO DI TESI è stato sviluppato a seguito di un periodo di tre mesi di tirocinio presso la società Gest S.p.A. gestore della linea tramviaria fiorentina.

Dal giorno dell'inaugurazione il 14 febbraio 2010, la tramvia di Firenze ha fatto registrare dati positivi sia in termini di capacità, circa 7.800.000 passeggeri/anno, che di frequenza, dimostrando l'alto tasso di gradimento da parte dei viaggiatori per il sistema di trasporto. Tuttavia, contestualmente a questo trend positivo si è anche registrata un'anomalia progettuale dovuta ad un eccessivo numero di perdita di priorità semaforica in corrispondenza delle intersezioni stradali.

Obiettivo della tesi dunque è stato quello di studiare la linea tramviaria in modo da analizzare i perditempo riscontrati dai tram durante il servizio giornaliero e trovare una possibile ipotesi di ottimizzazione dei tempi di percorrenza in modo da avvicinarli il più possibile a quelli previsti in fase progettuale.

Le numerose informazioni raccolte durante il periodo di tirocinio sul funzionamento del sistema informatico che gestisce le precedenza semaforiche al transito dei tram sono state fondamentali per l'individuazione delle problematiche legate al suo funzionamento.

Per poter studiare i tempi di percorrenza è stato necessario studiare le caratteristiche delle varie intersezioni presenti lungo la tratta T1 della linea tramviaria da Scandicci – Villa Costanza fino a Firenze, Santa

Maria Novella. Lungo tale tragitto sono presenti 18 intersezioni stradali e 31 attraversamenti pedonali, 23 dei quali collocati in corrispondenza delle 14 fermate. Il sistema informatico che gestisce la priorità delle suddette intersezioni, regolandone le fasi semaforiche in modo tale da garantire la priorità al passaggio dei tram, è costituito da una serie di sensori (Loop) che rilevano il passaggio dei tram con altissima precisione. Tale sistema si basa su un modello previsionale relativo al tempo di transito previsto tra un Loop e il successivo, per cui risulta necessario definire un modello orario estremamente preciso. Per poter creare tale orario, è stato necessario sintetizzare l'intera linea mediante un apposito grafo ad archi e nodi in modo tale da poter definire con precisione il tempo di percorrenza su ciascun arco della linea.

Per la gestione della priorità semaforica in corrispondenza di ogni intersezione stradale, troviamo tre tipi di sensori posizionati a distanze ben precise: il **Loop di priorità**, posto ad una certa distanza dall'intersezione, si attiva al passaggio del tram predisponendo la priorità tramviaria mediante la regolazione delle fasi di giallo e rosso al traffico veicolare; il **Loop di comando** che accerta la presenza del tram all'intersezione e il **Loop di rilascio** che trovandosi dopo l'intersezione ripristina le fasi semaforiche a favore del traffico veicolare. Se, a causa di ritardi dovuti



Analisi e ottimizzazione dei tempi di Applicazione alla linea

Ing. Salvatore

Relatore: Prof. Ing. Giorgio Sale

Università degli studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria - Corso di La

1 - DICEA :Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale Università de

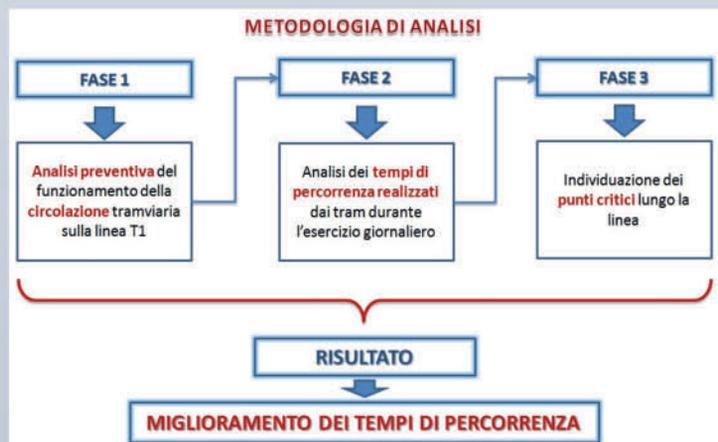
INTRODUZIONE

La nuova Tramvia di Firenze è stata inaugurata il 14 febbraio 2010. Da quel momento ha registrato dati positivi in termini di capacità di trasporto. Nel primo anno di entrata in servizio, infatti la società che gestisce la tranvia fiorentina "Gest S.p.A" ha registrato circa 7.800.000 passeggeri/anno con una media di circa 40.000 passeggeri nei giorni feriali e circa 28.000 nei festivi, dati che dimostrano l'alto tasso di gradimento da parte dei viaggiatori per il sistema di trasporto. Tuttavia, contestualmente a questo trend positivo, si sono riscontrate delle anomalie nell'acquisizione della precedenza semaforica in corrispondenza delle intersezioni stradali che nel lungo periodo hanno causato ritardi nel tragitto da una fermata all'altra e un eccessivo numero di arresti in corrispondenza dei semafori. Provocando un eccessivo tempo sul giro rispetto ai valori di progetto . Da qui, la necessità di uno studio approfondito al fine di analizzare la linea nella sua interezza alla ricerca della possibile causa generatrice della perdita di priorità da parte dei tram.



OBIETTIVI DELLO STUDIO

1. Analisi dei tempi di percorrenza realizzati dai tram durante il servizio giornaliero
2. Ricerca e quantificazione dei perditempo con individuazione dei punti critici
3. Ottimizzazione della linea tramviaria

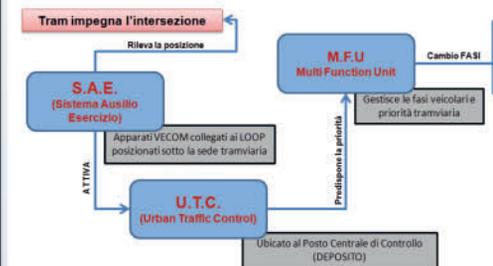


METODOLOGIA

L'analisi con cui è stato fatto lo studio si è art

FUNZIONAMENTO DELLA TRAMVIA

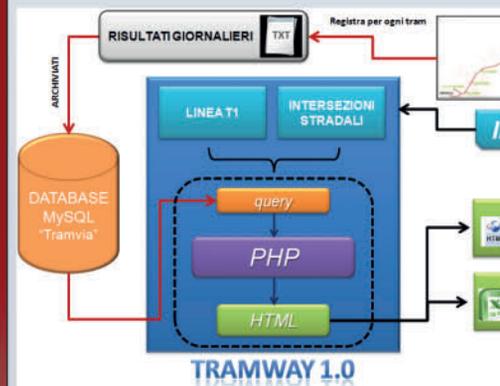
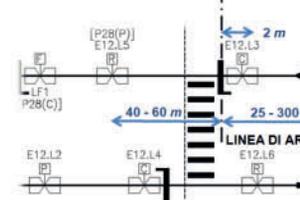
- > Circolazione in sede riservata e protetta
- > Acquisizione della **Priorità Semaforica** nelle intersezioni stradali e nei attraversamenti pedonali



SENSORE DI PRIORITÀ SEMAFORICA

- Sensore di Priorità: Predispone la priorità mediante la regolazione fasi di giallo e rosso al traffico veicolare
- Sensore di Comando: Accerta la presenza del tram all'intersezione
- Sensore di Rilascio: Rilascia l'intersezione a favore del traffico ve

Esempio di intersezione stradale



Analisi di percorrenza di una linea tramviaria:

Linea T1 Firenze - Scandicci

Autore: Salvatore Giambona

Università: Università di Firenze - Correlatore: Dott. Luca Bartolini²

Titolo: Tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile ind. Infrastrutture

Università: Università di Firenze

2 - Gest S.p.A



FASE DI ANALISI

Analisi articolata in tre fasi:



La prima fase dell'analisi si è incentrata sullo studio del sistema informatico che sta alla base dell'acquisizione della priorità semaforica, con particolare attenzione alle intersezioni stradali. L'attenzione si è rivolta soprattutto al posizionamento dei sensori (LOOP) che ricevono il segnale trasmesso dal tram durante il suo passaggio facendone registrare la presenza.

Nella linea sono presenti 182 LOOP, questi permettono di trattare l'intera linea come un grafo Archi-Nodi. Ciascun arco compreso tra due LOOP consecutivi è caratterizzato da un tempo di percorrenza prestabilito (espresso in secondi), tempo che permette la gestione della priorità semaforica.

Analisi di percorrenza delle fasi semaforiche e gestione del traffico veicolare.



INPUT

OUTPUT (VIDEO)

OUTPUT (XLS)

Nella seconda fase per poter elaborare in modo corretto la mole di dati generata dal sistema informatico (circa 15.000 al giorno) è stato necessario utilizzare un applicativo, da me personalmente realizzato, scritto in PHP chiamato: TRAMWAY 1.0 che si appoggia su un database appositamente realizzato in MySQL.

Mediante tale applicativo è stato possibile eseguire una doppia analisi: quella relativa all'intera linea e quella relativa ai singoli punti critici. Inoltre tale analisi si è concentrata su due mesi ritenuti di particolare interesse, ovvero i mesi di Febbraio e Marzo 2011. Nel primo i tram hanno girato con un tempo superiore del 51,9% dei casi mentre nel mese successivo hanno superato del 43,2% il tempo medio di percorrenza, stimato in 23,22 minuti.

Da tale analisi è stato possibile individuare tre potenziali punti critici.

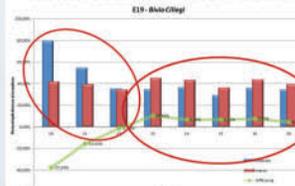
INTERSEZIONE	N. Soste Semaforiche	PERCENTUALE
E1	272	96,55%
E2	9	3,32%
E3	100	37,04%
E4	45	16,61%
E6	2	0,74%
E9	24	8,86%
E10	3	1,11%
E12	21	7,75%
E13	0	0%
E14	0	0%
E15	1	0,37%
E17	1	0,37%
E19	118	43,54%
E20	2	0,78%

RISULTATI

Il BIVIO CILIEGI è gestito da due archi. Ogni arco è contraddistinto da un tempo di percorrenza.

ARCO	Progetto	Febbraio	Marzo
CIL.T21	6"	4"	6"
JCILD	14"	11"	14"

ANALISI DELLA PERDITA DI PRIORITÀ



Analizzando il comportamento dell'arco CIL.T21 nel periodo compreso tra il 10 e il 18.

I risultati di Marzo (6") sembrano funzionare meglio per i primi 3 GIORNI.

I risultati di Febbraio (4") funzionano meglio per i restanti 5 GIORNI.

ESISTE UNA RELAZIONE ???

TEST STATISTICO: t STUDENT PER CONFRONTO DELLE MEDIE

Per verificare l'attendibilità del parametro stimato

Confronto statistico valori intersezione E19 - Bivio Ciliegi con altre 5 similari



INTERSEZIONE	Lungh. Arco	DIFFERENZA
E2 - via Alamanni	46,22	2
E4 - via Il Prato	84,80	9
E9 - via Pisana	74,14	2
E12 - Rot. S. Lorenzo1	270,01	1
E17 - v. S. Bartolo in Tuto	117,44	0
E19 - Bivio Ciliegi	23,56	-2

IPOTESI STATISTICHE:

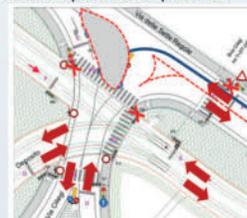
IPOTESI NULLA $H_0: \mu_{Febbraio} \equiv \mu_{Marzo}$

IPOTESI ALTERNATIVA $H_1: \mu_{Febbraio} \neq \mu_{Marzo}$

RISULTATO: 66,7% dei casi rifiuta l'IPOTESI NULLA

IL PARAMETRO STIMATO È UN BUON INDICATORE ...

Dei tre potenziali punti critici riscontrati solo l'intersezione del Bivio Ciliegi è risultata anomala in termini di perdita di priorità.



La terza e ultima fase dello studio si è quindi incentrata su tale punto.

Si è proceduto ad un'analisi più precisa del comportamento dell'arco nei mesi di Febbraio e Marzo.

Attraverso il test statistico t-student si sono messe in relazione le medie dei tempi realizzati dai tram sull'arco compreso tra il Loop di Precedenza (P) e di Comando (C) responsabile della precedenza semaforica, confrontando quello del Bivio Ciliegi con altre 5 intersezioni ritenute paragonabili in termini di criticità e funzionamento.

CONCLUSIONI

Il problema della perdita di priorità dell'intersezione E19 - Bivio Ciliegi:

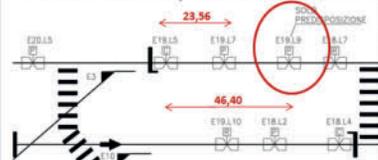
- Non è legato ai tempi di percorrenza assegnati nell'arco corrispondente
- Alla base potrebbe esserci un posizionamento non corretto dei sensori

INTERSEZIONE	Lunghezza Arco
E2 - via Alamanni	46,22
E4 - via Il Prato	84,80
E9 - via Pisana	74,14
E12 - Rot. S. Lorenzo1	270,01
E17 - v. S. Bartolo in Tuto	117,44
E19 - Bivio Ciliegi	23,56

La distanza ridotta del sensore di priorità non permette il cambiamento in tempo delle fasi semaforiche

UNA POSSIBILE SOLUZIONE?

Attivare un sensore presente nella sede tramviaria posto a 46,40m dal sensore di comando



MOTIVO ?

LA SUA DISTANZA SAREBBE TALE DA RIDURRE DEL 35,71% LA PERDITA DI PRIORITÀ

Dall'analisi è emerso che il problema non è da imputare ad errori di taratura dei tempi di attraversamento dell'arco ma probabilmente ad un posizionamento scorretto del loop di precedenza relativo al Bivio Ciliegi. È in fatti emerso che la distanza di tale sensore è troppo corta rispetto alla media delle altre intersezioni omogenee analizzate.

Tale ipotesi è stata successivamente confermata dall'azienda progettista del sistema informatico di acquisizione della priorità semaforica. Dalla mia analisi è risultato che attivando un loop attualmente presente e non collegato, posto a una distanza di 46,40m, si potrebbe ridurre la perdita di priorità di quasi il 40%.

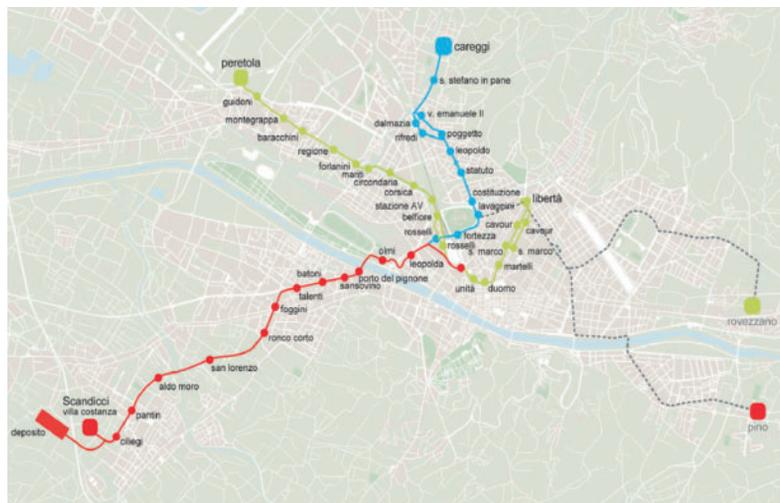
Ing. Salvatore Giambona

Ordine degli Ingegneri provincia di Firenze: n.6521 Sez. A Civile/Ambientale

Via del Prato, 54 - 50019 Sesto Fiorentino (FI)

Phone: +39 338 131 5948 Email: salvatore.giambona@gmail.com

▼ Fig. 1 - Mappa schematica del tracciato della rete tramviaria



ad una marcia troppo lenta o a un tempo eccessivo per l'arco compreso tra il Loop di priorità e quello di comando, il tram che ha già fatto rilevare la sua posizione al Loop di priorità non transita entro 20 secondi dal tempo programmato sul Loop di comando, il sistema restituisce il via libera al traffico veicolare facendo perdere la priorità al tram.

Ogni Loop predisposto lungo la linea registra i dati di passaggio del tram inviando tali informazioni all'unità centrale predisposta al posto di controllo. Tali dati acquisiti e salvati in un'apposita banca dati contengono un certo numero di informazioni, tra le quali la posizione e l'orario di passaggio del tram.

Ogni file contiene le informazioni relative al passaggio su ciascun Loop dei 15 tram, normalmente in servizio dalle 4:20 del mattino fino alla mezzanotte, per un numero di record compreso tra i 60.000 e i 106.000 a seconda del giorno della settimana considerato. Per poter analizzare questa mole di dati occorre uno strumento che fosse di rapida esecuzione e facilmente interrogabile ai fini dell'analisi e ricerca degli eventuali punti critici. Si è ritenuto necessario pertanto creare uno strumento specifico per tale analisi, utilizzando un database in MySQL in cui inserire le informazioni relative al passaggio dei tram sui Loop della linea e creando un apposito applicativo in PHP denominato "Tramway 1.0".

Di seguito vengono riportate brevemente le operazioni che è possibile fare mediante l'applicativo Tramway 1.0:

- **Analisi dei tempi di percorrenza:** mediante cui è possibile calcolare i tempi realizzati tra due

fermate successive o tra due punti qualsiasi della linea;

- **Report Riassuntivo Ritardi:** mediante cui viene restituita una visione complessiva dell'andamento giornaliero dei tram in esercizio su un determinato arco considerato;
- **Calcolo dei tempi di sosta su singolo Loop:** dove vengono calcolati i tempi di sosta del tram su ciascun Loop presente sulla linea, oltre a calcolare gli effettivi tempi di fermata su ciascuna fermata.

Una parte del programma è dedicata all'analisi dell'intersezione semaforica, creata per poter studiare e ricercare eventuali criticità sulla linea stessa. Su tale sezione è possibile effettuare le seguenti analisi:

- **Tempi di attraversamento intersezione stradale,** dove viene calcolato il tempo realizzato dal tram nell'attraversamento di una delle 20 intersezioni presenti;
- **Tempo di sosta Loop intersezione,** funzione che serve a calcolare il tempo di sosta del tram sul Loop di comando semaforico;
- **Report riassuntivo intersezione,** come il precedente, riporta il riepilogo generale sull'andamento giornaliero dei tram in servizio in una determinata intersezione, funzione necessaria al fine di tenere sotto controllo il funzionamento della priorità semaforica.

Oltre alla velocità di esecuzione dei calcoli, l'applicazione è stata scritta con la logica di avere un'immediata facilità di interpretazione dei risultati che vengono restituiti dall'analisi. Per tale motivo è stato inserito un sistema di colori che rende immediata l'interpretazione dei dati. I criteri con cui i dati acquisiscono una certa colorazione dipende dal tipo di analisi eseguita. Nel caso dell'analisi del tempo di percorrenza della linea si è utilizzata una scala cromatica composta da cinque colori tarata sul valore dF (*differenziale tra i tempi realizzati e quelli programmati dal gestore*). Fino a un valore di 12 secondi il tram è ancora in orario, tra 120 e 180 secondi è in lieve ritardo, e superati i 180 secondi è in ritardo sostenuto.

Stesso ragionamento è stato fatto anche nella parte riguardate l'analisi dell'intersezione, in questo caso si analizza il comportamento del tram nell'intersezione analizzata. Si è utilizzata una scala cromatica di tre colori che riprende quelli dell'impianto semaforico. Per poter riprodurre con precisione il comportamento

del conducente, è stato opportuno effettuare diversi sopralluoghi in tempi diversi, i parametri individuati sono principalmente legati alla velocità e al differenziale dei tempi dF si avrà pertanto:

- VERDE (PRECEDENZA) $v \geq 16$ km/h e $dF \leq 2$ secondi;
- GIALLO (RALLENTA) $7,5$ km/h $< v < 16$ km/h e $2 < dF < 6$ secondi;
- ROSSO (STOP) $v \leq 7,5$ km/h e $dF > 6$ secondi.

Ai fini dell’analisi è stato creato un riquadro riepilogativo sotto ogni tabella riportante i valori statistici utili ai fini dell’analisi, come la media, la deviazione standard, il numero di corse effettuate, ma anche il tempo totale giornaliero, il numero di fermate e il tempo perso al semaforo.

L’applicativo è stato inoltre strutturato in modo tale da poter estrarre i dati mediante un qualunque foglio di calcolo tipo Excel in modo da poter usare i dati estratti per ulteriori analisi.

I risultati ottenuti dall’applicativo Tramway 1.0 sull’intera linea, nel periodo di analisi compreso tra febbraio e marzo, dimostrano che il mese di marzo ha un andamento migliore rispetto a quello di febbraio, pur rimanendo al di sopra del valore di riferimento. Infatti il mese di febbraio ha registrato valori superiori nel 51,90% dei casi, contro il 45,25% del mese di marzo. Tale discordanza è da imputare sicuramente ad una perdita di priorità semaforica.

Un’analisi più accurata di tutte le intersezioni ha ristretto il range dei possibili punti critici a 14 intersezioni.

I risultati dell’analisi sui tempi di percorrenza relativi alle suddette 14 intersezioni stradali hanno evidenziato tre potenziali punti critici. La prima intersezione, “via Orti Oricellari”, presenta una percentuale altissima di fermate al semaforo (99,83%), a causa della vicinanza con la fermata S.M. Novella. Infatti, indagini sul campo hanno dimostrato che un ritardo alla partenza con segnale di via libera in corrispondenza del capolinea comporta la perdita di precedenza a causa di una non perfetta sincronizzazione dei due semafori. Anche l’intersezione di “via della Scala” presenta un numero elevato di perdite di priorità (36,70%), ma il motivo è dovuto alla rottura del deviatoio in corrispondenza della curva tra via Fratelli Rosselli e via da Diacceto, che comportava una riduzione della velocità dei tram a 3 km/h (velocità sicuramente non sufficiente a mantenere la priorità fornita dal semaforo). La terza interse-

zione è invece quella più complessa e non ha una spiegazione come le precedenti. Infatti l’intersezione del bivio Ciliegi registra un numero di perdite di priorità dell’ordine del 67,46%, corrispondente ad un numero di semafori rossi intercettati del 35,91% sul tempo totale.

Alla luce di tali risultati è apparso evidente come tale intersezione risultasse sicuramente un punto critico su cui approfondire le ricerche.

Dato che l’attribuzione della priorità inizia nel momento in cui il tram transita sopra il Loop di priorità impegnandolo e conseguentemente accendendo la lanterna di presegnalazione, se il tram viaggia ad una velocità media di almeno 15km/h (velocità normalmente prevista per il transito agli incroci stradali) passeranno mediamente 15 secondi per ottenere il segnale di via libera, di cui 12 secondi per attivare la lanterna di presegnalazione. Inoltre contemporaneamente vengono cambiate tutte le fasi semaforiche. Il tempo medio di percorrenza sull’intersezione da parte dei tram è stimato in 1-2 secondi, oltre il quale, transitando sul rispettivo Loop di rilascio il tram libera l’intersezione ripristinando il via libera alle lanterne semaforiche veicolari.

Da ciò appare evidente come il tratto nevralgico per l’ottenimento della priorità a favore del tram sia l’arco CIL.T21. Per stabilire se il funzionamento con i tempi modificati nel mese di febbraio risultassero migliori rispetto a quelli di marzo, in cui sono stati ristabiliti i valori di progetto, è stata eseguita una doppia analisi. La prima è servita a calibrare il comportamento del sistema semaforico con i tempi modificati nel mese di febbraio, mentre la seconda aveva lo scopo di relazionare i risultati ottenuti con quelli di progetto ripristinati nel mese di marzo.

▼ Fig. 2 - Nuova fermata Resistenza



L'analisi è stata condotta considerando un intervallo temporale ben preciso, concentrato tra il 10 e il 18 febbraio in modo tale da far rientrare il picco riscontrato nel diagramma sull'andamento dei tempi sull'intera linea. Chiaramente è stato utilizzato il medesimo intervallo anche per il mese successivo.

Dall'applicativo Tramway 1.0 si sono ricavati una serie di valori che denotano il mancato funzionamento della priorità semaforica a favore del tram; a titolo di esempio sul tram n. 11 su 13 corse realizzate nell'arco dell'intero servizio si è fermato 8 volte a causa della mancata priorità, corrispondente al 61,54% del totale, con notevoli ripercussioni sul servizio offerto ai viaggiatori.

Complessivamente la perdita di priorità semaforica, per l'intersezione in esame, è stata del 42,48% nel mese di febbraio, contro il 40,30% del mese successivo, dove è stato ristabilito il valore iniziale. Tali valori sono risultati discordanti rispetto al tempo di percorrenza dell'arco in esame, infatti nel mese di febbraio i tram hanno girato in 4 secondi rispetto ai 6 del mese di marzo.

Per capire se il parametro utilizzato per l'analisi, ovvero il tempo di percorrenza, fosse un dato non influenzabile è stata fatta un'ulteriore verifica per stabilire l'attendibilità del parametro. Questa è stata eseguita mediante un confronto diretto tra l'intersezione in esame (bivio Ciliegi) con altre intersezioni presenti lungo la linea e in prima analisi simili. Ricerca non facile, data l'eterogeneità delle stesse e delle zone considerate. In totale si sono ricavate 5 intersezioni. Come parametro di confronto si è considerata la lunghezza dell'arco compreso tra il Loop di priorità è quello di comando.

L'analisi di confronto è stata effettuata utilizzando il test statistico "t-Test" e partendo dai valori ottenuti dall'applicativo Tramway 1.0. Questo, al fine di validare i dati ottenuti e cercare un parametro che sia univoco alla ricerca della possibile causa.

Partendo da dati preoccupanti, dove si riscontravano perdite di priorità semaforica stimate dell'ordine del 47%, le analisi statistiche effettuate nei suddetti periodi di riferimento non hanno dato come risposta immediata alcuna relazione che spiegherebbe il cambiamento nei tempi di percorrenza, indice che il parametro preso in considerazione non era forse il migliore stimatore per cercare una relazione ottimale.

In realtà effettuando un confronto dei dati ottenuti nell'intersezione del bivio Ciliegi con altre, tenden-

zialmente definite come paritetiche e differenti solo nella distanza del posizionamento dei Loop di priorità e comando, è emerso un dato significativo, in quanto il parametro utilizzato, ovvero il cambiamento dei tempi di percorrenza dell'arco, è risultato un dato valido per un confronto statistico e questo rafforza ulteriormente la conclusione che i problemi riscontrati nell'intersezione studiata sono da imputare ad un posizionamento dei Loop non corretto.

La causa è pertanto da imputare alla lunghezza dell'arco CIL.T21 che è risultato insufficiente a permettere al sistema di regolare in tempo le fasi semaforiche a favore di quella tramviaria, creando di fatto le continue perdite di priorità riscontrate; peraltro a nulla è valsa neppure la modifica dei flussi di traffico veicolari suggerita da GEST.

Sicuramente una soluzione potrebbe essere quella di attivare il Loop, posto appena prima dell'attuale Loop di priorità attualmente in funzione, presente già nella sede ma attualmente non collegato all'apparato informatico. Tale Loop si troverebbe a una distanza di 46,40 m da quello di comando, distanza considerata sufficiente a ridurre le fermate al semaforo, in quanto tale è la misura della gran parte delle intersezioni analizzate, in cui l'incidenza della perdita di priorità è bassa rispetto al numero dei passaggi totale.

In conclusione, tenuto conto della sperimentabilità dell'applicativo di analisi Tramway 1.0 e del suo possibile miglioramento, la necessità di ottimizzare la linea non è esclusivamente legata alla definizione di nuovi tempi di percorrenza, così come inizialmente supposto, ma appare evidente come sia connessa alla verifica del sistema informatico integrato della linea ed eventualmente alla sua rielaborazione non più basata su previsioni di traffico ma su dati realmente realizzati e riscontrati in prossimità delle intersezioni. Tuttavia in attesa di ciò la GEST con la semplice attivazione di un Loop, già presente nella linea, potrebbe nell'immediato ridurre i problemi presenti nell'intersezione migliorando il servizio offerto ai viaggiatori.

A conti fatti, l'applicativo si è rivelato un ottimo strumento di analisi, applicabile non solo ai fini del presente lavoro ma come vero e proprio strumento di verifica e ottimizzazione della linea, dato che attraverso tale applicativo è possibile in poco tempo verificare le ripercussioni sulla linea di eventuali modifiche ai tempi di percorrenza sui singoli archi.

INGEGNERE IUNIOR

Marilena Zarrillo

TITOLO TESI: *Simulazione CFD di un eiettore per impianto frigorifero*

RELATORE: **Prof. Giuseppe Grazzini**

Inquadramento del tema trattato e lavoro svolto

Il lavoro di tesi qui riportato si è inserito all'interno della collaborazione tra l'ex Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco" dell'Università degli Studi di Firenze e la ditta Frigel S.p.a. Tale collaborazione è volta alla progettazione di un impianto di refrigerazione ad eiezione per impieghi industriali, con potenza frigorifera di 50 kW, fornita all'utenza nell'intervallo di temperatura di 7°-12°C.

Le proposte tecnologiche presenti ad oggi nel mercato degli impianti frigoriferi sono disparate, ma possiamo affermare che l'impianto di refrigerazione più diffuso a livello mondiale sia l'impianto a compressione grazie all'elevata versatilità ed affidabilità, nonché alle elevate prestazioni che è in grado di garantire. Uno dei suoi aspetti più limitativi, tuttavia, è riscontrabile nell'esigenza di alimentare il ciclo mediante energia elettrica; necessità che non solo aumenta i costi di funzionamento dell'impianto ma che contribuisce in maniera indiretta all'inquinamento ambientale.

L'alternativa a tale impianto può essere rappresentata dai cicli frigoriferi ad alimentazione termica, qualora siano disponibili sorgenti a bassa temperatura idonee all'uso. Tra questi, la tipologia maggiormente impiegata è costituita dai cicli ad assorbimento che però presentano un notevole costo d'impianto, tanto più elevato quanto minore è la temperatura della sorgente termica che alimenta il ciclo e, pertanto, non rappresentano spesso una soluzione impiantistica conveniente.

Per questo motivo si è scelto di sviluppare un impianto frigorifero ad eiezione, tipologia d'impianto che gode attualmente di un rinnovato interesse da

parte della comunità scientifica ed è considerato il principale competitor dei cicli ad assorbimento. Rispetto a questi ultimi, infatti, presenta minori costi d'impianto, alta affidabilità, scarsa necessità di manutenzione e può essere alimentato da energia termica a temperatura relativa bassa, costituita da calore di scarto prodotto da lavorazioni industriali, da impianti di cogenerazione con motori a combustione interna o da fonti energetiche rinnovabili, quali collettori solari oppure combustione di biomassa a basso potere calorifero. Gli impianti ad eiezione sono inoltre caratterizzati da bassi costi d'impianto (prevalentemente da imputare alla pompa ed al generatore di vapore), e da elevata versatilità rispetto al fluido frigorifero utilizzabile. Complessivamente essi non necessitano di lubrificazione e presentano un rischio di rottura molto basso perché non sono costituiti da parti in movimento (fatta eccezione per la pompa); possono quindi essere considerati molto stabili, economici e scarsamente inquinanti.

Purtroppo, ad oggi, bisogna constatare il fatto che gli impianti ad eiezione garantiscono prestazioni decisamente inferiori rispetto ai cicli ad assorbimento. Il coefficiente di prestazione (COP) di questi ultimi, infatti, è valutato in media tra lo 0,6 e lo 0,9, mentre i cicli ad eiezione raramente superano lo 0,4, ma presentano un elevato rendimento di secondo principio. Per aumentarne la competitività è, quindi, necessario cercare di ottimizzare le prestazioni dell'impianto, agendo in particolar modo sull'elemento che maggiormente influenza tale parametro: l'eiettore. Durante questa tesi è stata effettuata l'analisi CFD dell'eiettore studiato sperimentalmente presso la ditta Frigel, con

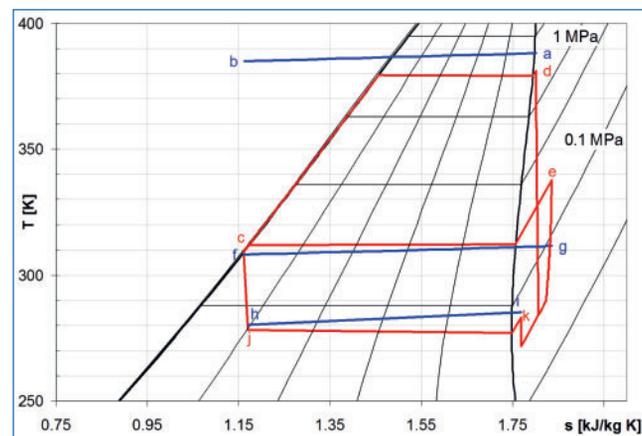
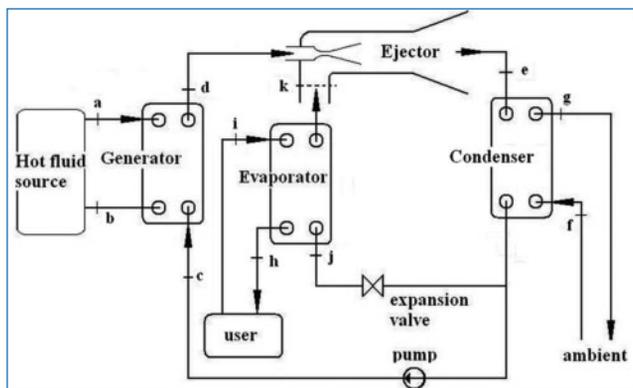
lo scopo di ottimizzarne il funzionamento, fornire un valido supporto alle indagini sperimentali ed ottenere utili informazioni sull'esercizio dell'impianto.

Funzionamento dell'impianto ad eiezione

Nell'impianto di refrigerazione ad eiezione il compressore è sostituito da un ciclo motore, costituito dall'insieme della pompa, del generatore di vapore e dell'eiettore, la cui funzione è quella di alimentare un ciclo frigorifero, secondo lo schema impiantistico riportato in figura 1.

Il refrigerante allo stato liquido è introdotto nel ciclo tramite il generatore di vapore, che riceve in ingresso il calore di alimentazione dell'impianto e fornisce all'eiettore il vapore a pressione più elevata. Tale fluido, denominato "primario", attraversa la parte iniziale dell'eiettore, caratterizzata da un condotto convergente-divergente ("ugello primario"), nel quale viene espanso ed accelerato fino a raggiungere velocità supersonica. Entra quindi nella camera di miscelamento, dove avviene il miscelamento con un flusso "secondario" (a bassa pressione e temperatura), proveniente dall'evaporatore. Si ottiene così un unico flusso con caratteristiche il più possibile uniformi, che verrà poi decelerato e compresso in un diffusore subsonico, fino al raggiungimento della pressione necessaria per il funzionamento del condensatore. In quest'ultimo condensa il fluido che sarà in parte mandato alla pompa di alimentazione (per chiudere il ciclo termodinamico) ed in parte all'evaporatore, che alimenta l'utenza, per poter produrre l'effetto utile del ciclo frigorifero.

L'intero processo avviene entro due temperature limite (figura 2): una massima, che corrisponde alla temperatura di evaporazione del fluido all'interno del generatore di vapore, ed una minima, corrispondente alla temperatura di funzionamento dell'evaporatore. Il ciclo motore preleva energia dalla sorgente calda e



▲ Fig. 2 - Diagramma T-s del ciclo ad eiezione riportato in figura 1

la converte in lavoro, per poi cederla alla sorgente a temperatura intermedia. Il lavoro così ottenuto è utilizzato per alimentare il ciclo frigorifero e viene a questo trasmesso tramite l'eiettore, che funge da organo di collegamento tra i due cicli.

Funzionamento dell'eiettore

L'eiettore è sicuramente l'elemento più delicato in fase di progettazione in quanto le sue prestazioni variano fortemente al variare della geometria e delle condizioni operative. Geometricamente, le parti fondamentali in cui esso può essere suddiviso sono sostanzialmente quattro:

- l'Ingresso primario, costituito da un ugello convergente-divergente, posto all'inizio dell'eiettore e che riceve il fluido in uscita dal generatore di vapore;
- l'Ingresso secondario, coassiale al primario, dal quale viene aspirato il fluido proveniente dall'evaporatore;
- la Mixing chamber, nella quale avviene il miscelamento tra i due fluidi;
- il Diffusore subsonico, posto alla fine dell'eiettore. Vi avviene il recupero di pressione prima del condensatore.

Il funzionamento può essere descritto come segue: il fluido primario in uscita dal generatore, caratterizzato da elevata temperatura e pressione, entra nell'ugello primario con velocità subsonica. Qui viene espanso e la sua energia interna viene convertita in energia cinetica, fino ad ottenere, all'uscita di tale ugello, velocità supersoniche. Entra quindi nella zona iniziale della mixing

◀ Fig. 1 - Schema dell'impianto frigorifero ad eiezione

chamber, dove genera una depressione che richiama all'interno dell'eiettore il fluido secondario, proveniente dall'evaporatore e caratterizzato da temperatura minore. Quest'ultimo, partendo dalle condizioni di ristagno ($Mach < 0,2$) subisce un progressivo aumento di energia cinetica e accelera gradualmente lungo la mixing shear layer, fino a raggiungere e poi superare la velocità sonica oltre la quale può aver luogo il processo di miscelamento tra i due fluidi. Durante tale processo i due flussi si scambiano quantità di moto, energia cinetica ed energia interna, fino a dar vita ad un flusso sostanzialmente uniforme, con caratteristiche intermedie a quelle dei due fluidi in ingresso. Questo, dopo aver raggiunto la velocità sonica nella sezione di gola dell'eiettore, entra nel diffusore subsonico, dove, a causa dell'elevata pressione presente a valle, si manifesta un urto retto che comprime il fluido e lo decelera bruscamente, facendolo passare da un regime supersonico ad uno subsonico. Il recupero di pressione continua poi, in maniera graduale, all'interno del diffusore.

Per quanto riguarda l'urto, va sottolineato che l'assunzione secondo la quale si ha a che fare con un urto puramente retto è valida esclusivamente in una trattazione monodimensionale del moto; nelle altre situazioni, non potendo considerare un'onda d'urto di spessore nullo, questo non è completamente retto, ma include dei successivi urti obliqui.

Il diffusore subsonico può essere sede di elevate perdite di pressione e quindi il suo profilo deve essere accuratamente ottimizzato: in questo caso la geometria è stata ottenuta a partire dal metodo "constant rate of momentum change" (CRMC) nel quale si impone un variazione costante della quantità di moto del fluido lungo la direzione assiale, in modo da ottenere (nella condizione operativa di design) l'assenza

dell'urto retto e riuscendo a realizzare un graduale aumento della pressione statica. Il profilo così ottenuto ha poi subito variazioni in fase di simulazione per ovviare ai distaccamenti dello strato limite e ricicli riscontrati nella sezione d'uscita del diffusore subsonico originario.

Prestazioni del ciclo

Come noto, il rendimento termodinamico di un ciclo frigorifero si calcola tramite il Coefficiente di prestazione (COP), ottenuto come rapporto tra l'effetto utile e la potenza (termica o meccanica) assorbita dal ciclo. Nel caso di un impianto ad eiezione, esso assume la forma:

$$COP = \frac{Q_{evaporatore}}{Q_{generatore} + W_{pompa}} \quad 1$$

In cui

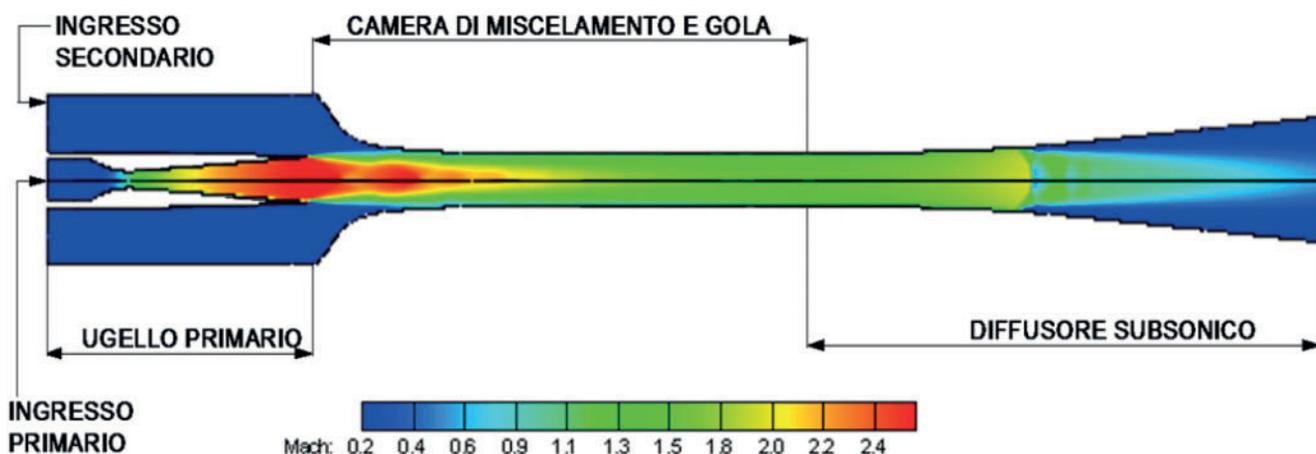
$Q_{evaporatore}$ = potenza termica scambiata nell'evaporatore (potenza frigorifera);

$Q_{generatore}$ = potenza termica scambiata nel generatore di vapore;

W_{pompa} = lavoro assorbito dalla pompa.

Il lavoro assorbito dalla pompa, pur essendo trascurabile rispetto a quello del generatore da un punto di vista quantitativo, non lo è qualitativamente. La potenza termica del generatore è, infatti, fornita dal calore derivante da processi esterni al ciclo, che altrimenti verrebbe semplicemente liberata in atmosfera: possiamo quindi affermare che l'energia che alimenta termicamente l'impianto possiede un livello qualitativo basso, che diminuisce al diminuire della sua temperatura. D'altro canto, l'energia elettrica assorbita

▼ Fig. 3 - Schema descrittivo dell'eiettore



dalla pompa possiede la massima qualità possibile e non può essere trascurata.

Considerando di nuovo l'espressione del COP riportata in 1 e sostituendo le potenze cedute o assorbite dai vari componenti, possiamo notare che il COP dell'impianto è direttamente proporzionale al rapporto tra le portate di fluido secondario e di fluido primario. Tale rapporto rappresenta un parametro caratteristico per descrivere il funzionamento dell'eiettore e prende il nome di Rapporto di trascinamento (E.R.).

$$E.R. = \frac{m''}{m'} \quad 2$$

$$COP = (E.R.) \frac{h_{IV}}{\Delta h_{IN}} \quad 3$$

In base a quest'ultima considerazione, diventa ancora più evidente la stretta influenza dell'eiettore sul rendimento dell'intero ciclo frigorifero.

Come già accennato, gli impianti frigoriferi ad eiezione spesso presentano coefficienti di prestazione piuttosto bassi (0,2-0,4). Bisogna però tener presente che, all'interno dei cicli ad eiezione, hanno luogo due conversioni energetiche: la prima avviene nel ciclo motore e converte energia termica in energia meccanica, mentre la seconda consiste nello sfruttamento di quest'ultima al fine di ottenere l'effetto frigorifero. Quando si calcolano le prestazioni del ciclo, su di esse possono pesare in maniera negativa anche le irreversibilità del ciclo motore, che solitamente sono contegiate esternamente.

Scelta del fluido frigorifero

Il refrigerante da utilizzare all'interno del ciclo ad eiezione è stato scelto in primo luogo sulla base di valutazioni sull'impatto ambientale, considerando i vari indici di inquinamento globale e le normative vigenti. Si è passati poi al confronto delle caratteristiche termodinamiche dei vari refrigeranti attualmente in commercio. Tali caratteristiche sono state individuate sia come quelle ritenute favorevoli per un impianto frigorifero tradizionale, sia per quelle specifiche per l'impianto in esame. Alla fine si è scelto di

utilizzare come fluido di lavoro l'1,1,1,3,3, pentafluoropropano (R245fa), un refrigerante appartenente alla famiglia degli idrofluorocarburi (HFC).

Simulazione CFD

Per ottimizzare il funzionamento dell'eiettore si è deciso di affiancare alla sperimentazione sull'impianto lo studio dell'eiettore ottenuto mediante la fluidodinamica computazionale.

Nel lavoro qui presentato, al fine di ottenere simulazioni il più possibile accurate, si è individuata una ben precisa procedura numerica da utilizzare, volta alla modellazione del fluido come gas reale. A questo scopo la scelta del software di simulazione si è orientata verso Ansys Fluent v14, in quanto esso permette di richiamare il "Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Database" (REFPROP) del National Institute of Standards and Technology (NIST). Questo programma implementa tre modelli termodinamici considerati tra i più vantaggiosi in termini di accuratezza e semplicità. Tra i refrigeranti contenuti in REFPROP è presente anche l'R245fa, per il quale è utilizzata l'equazione di stato esplicita nel potenziale di Helmholtz, che garantisce un errore rispetto ai dati sperimentali molto limitato. Nel calcolo della densità per la fase di vapore, per esempio, è stata rilevata un'incertezza massima dell'1% per temperature superiori ai 310 K, valore che inevitabilmente aumenta in prossimità della regione critica.

L'utilizzo di tale subroutine non è stata immediata e ha comportato l'individuazione di una serie di passaggi che hanno come punto di partenza l'ottenimento di simulazioni effettuate modellando il fluido come un gas perfetto. In queste il fluido è stato modellato come un gas termicamente perfetto, per il quale le proprietà termodinamiche e di trasporto sono state ricavate con funzioni polinomiali che interpolano i dati sperimentali contenuti in refprop in due casi particolari: nel primo è stato imposto un riscaldamento isobaro e nel secondo una espansione isoentropica. Le simulazioni effettuate con l'approssimazione di gas perfetto sono state utilizzate non solo come punto di partenza per il successivo utilizzo di REFPROP, ma

Tabella 1 - Caratteristiche dell'R245fa

PESO MOLECOLARE	TEMPERATURA CRITICA [K]	PRESSIONE CRITICA [MPA]	PUNTO D'EBOLLIZIONE NORMALE [K]	CAMPANA DEL VAPORE	CLASSIFICAZIONE ASHRAE	GWP	ALT [ANNI]
134,05	427,16	3,651	288,29	DRY	B1	950	7,2

anche come un interessante termine di paragone per il confronto dei risultati ottenuti con tale subroutine.

Il funzionamento dell'eiettore è stato valutato in un ampio range di condizioni operative, ottenuto variando di volta in volta o la pressione del fluido all'ingresso dell'ugello primario oppure la pressione di uscita dall'eiettore. Durante tutte le simulazioni sono state mantenute invariate sia le condizioni operative del fluido secondario proveniente dall'evaporatore, che la Nozzle Exit Position dell'ugello primario. Mantenendo costante la pressione d'uscita dell'eiettore e variando la pressione d'ingresso del fluido primario (P_g), è stato evidenziato il seguente trend: il rapporto di trascinamento aumenta al diminuire di P_g fino ad un valore massimo, oltre il quale, continuando a diminuire la P_g , l'E.R. diminuisce bruscamente.

Inoltre, all'aumentare di P_g , aumenta la lunghezza del treno di urti obliqui nella camera di miscelamento, ma ne diminuisce l'intensità. L'urto retto si sposta progressivamente verso la sezione d'uscita ed aumenta il rapporto di compressione da esso generato.

Al variare della pressione di uscita (che coincide con la pressione al condensatore) è stata ottenuta la tipica curva caratteristica dell'eiettore. Considerando solo i valori di pressione per cui si raggiunge il choke del fluido secondario, possiamo suddividere il comportamento dell'eiettore in tre zone distinte, a cui corrispondono tre diversi regimi di funzionamento. Essi sono:

- Regime di CHOKED FLOW, per pressioni inferiori a quella critica e caratterizzato da valori costanti del rapporto di trascinamento;
- Regime di UNCHOKED FLOW, per pressioni superiori a quella critica, nel quale si verifica esclusivamente il choke del fluido primario, mentre il secondario rimane sempre in regime subsonico;
- Regime di REVERSED FLOW, ossia in un campo di funzionamento in cui la pressione statica all'outlet è talmente elevata da non permettere più l'ingresso del fluido secondario all'interno.

È quindi possibile notare che, al diminuire della pressione d'ingresso del fluido primario aumenta il rapporto di trascinamento, ma diminuisce contemporaneamente il campo di stabilità dell'eiettore perché diminuisce il valore di pressione limite che delimita il campo di funzionamento "choked". Tale considerazione può assumere un ruolo fondamentale nella caratterizzazione del campo di funzionamento dell'eiettore.

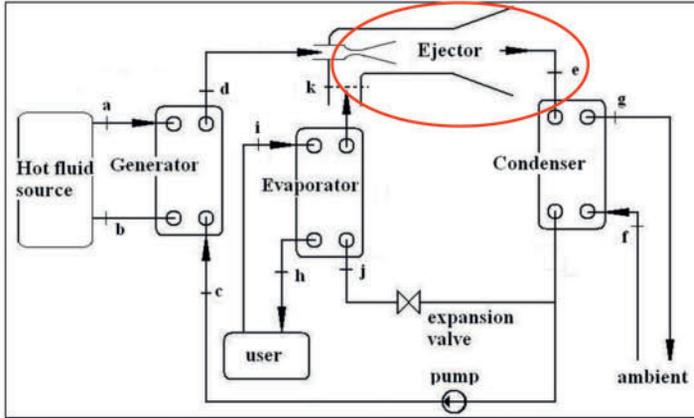
Innovazioni e possibile impatto applicativo dei risultati ottenuti

Gli aspetti applicativi sono intrinseci all'elaborato, in quanto tale lavoro parte da una reale collaborazione stipulata dall'Università degli Studi di Firenze e si affianca ad un impianto in sperimentazione. Il proseguire in parallelo dei due studi sull'impianto consente di confrontare in tempi rapidi i risultati numerici con quelli sperimentali e quindi di modificare la modellazione fluidodinamica qualora essa risultasse lacunosa, portando ad ulteriori possibilità di sviluppo e di perfezionamento. D'altra parte, le simulazioni forniscono delle linee guida alla sperimentazione; nei risultati appena descritti, infatti, è stata sottolineata l'identificazione del campo di funzionamento dell'impianto, ottenuta con un'incertezza accettabile per questa fase preliminare. Grazie a questi dati è quindi possibile sviluppare una prima strategia di regolazione del ciclo e prevedere il suo comportamento al variare delle condizioni operative.

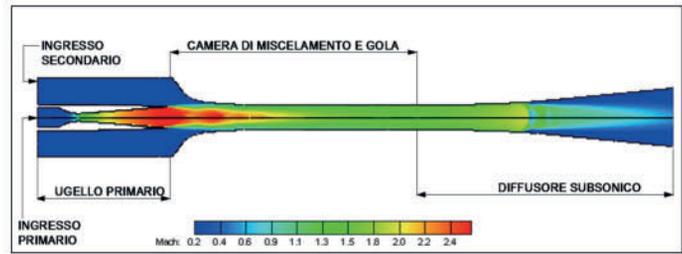
Rilevanza scientifica dei risultati ottenuti

I trend osservabili dei consumi energetici globali, dimostrano che questi sono in continuo aumento e, in particolar modo, sono in rapida crescita i consumi imputabili alla produzione del freddo. Per questo motivo è importante cercare di sviluppare al meglio cicli frigoriferi alternativi a quelli a compressione, che non richiedono come fonte di alimentazione l'utilizzo di energia elettrica. Uno di questi è il ciclo ad eiezione, che può essere alimentato con energia termica di scarto o anche prodotta da fonti rinnovabili. Le sue prestazioni, però, lo rendono ad oggi non competitivo, motivo per il quale è necessario un ampio lavoro volto al suo sviluppo ed alle sue ottimizzazioni. Con questo intento si è sviluppata la mia tesi: modellare accuratamente il fluido utilizzato ed i fenomeni fluidodinamici al fine di comprenderli al meglio ed ottimizzare il funzionamento dell'eiettore. Sviluppando al meglio l'analisi CFD è infatti possibile ottenere importanti indicazioni sulla geometria da utilizzare e caratterizzare il comportamento dell'impianto in un ampio intervallo di condizioni operative, riuscendo quindi a prevederne il funzionamento. Il mio lavoro di tesi può essere visto come un ulteriore passo in avanti per lo sviluppo futuro di un progetto molto ambizioso quanto potenzialmente rivoluzionario: lo sviluppo di un ciclo ad eiezione con prestazioni competitive.

Simulazione CFD di un eiettore per impianto frigorifero



Schema dell'impianto ad eiezione, $COP = (E.R.) \frac{h_{12}}{\Delta h}$



Parametri descrittivi dell'eiettore:

- Rapporto di trascinamento E.R. = $\frac{m''}{m'}$
- Coefficiente di pressione

E.R. Influenzato da:

- Geometria
- Fluido di lavoro (R245fa)
- Condizioni operative

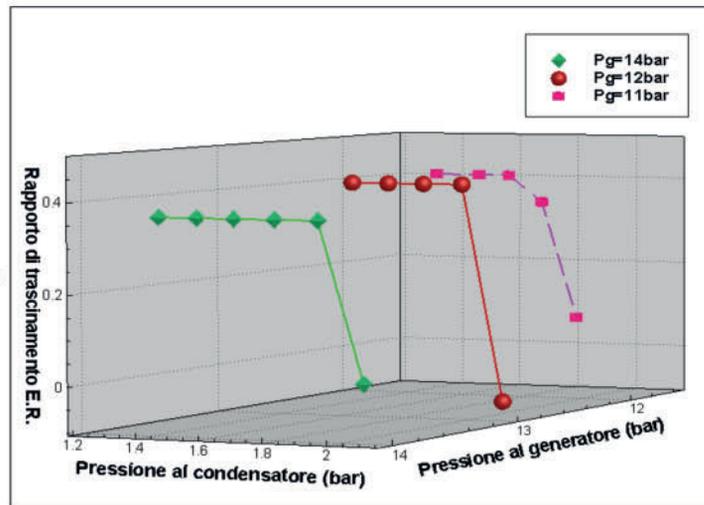
Studio delle prestazioni al variare delle condizioni operative:

È stato studiato l'andamento del rapporto di trascinamento al variare di:

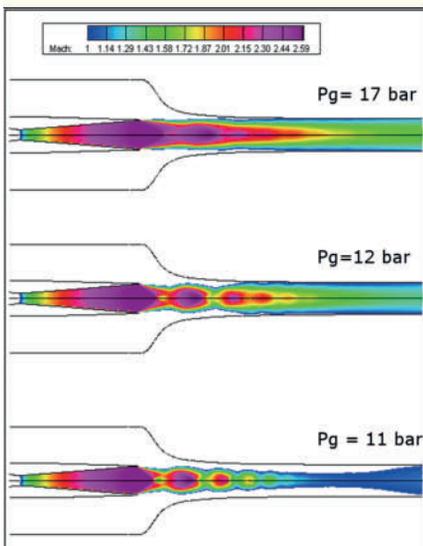
P_g = Pressione al generatore dell'impianto, corrisponde alla pressione d'ingresso del fluido primario;

P_{cond} = Pressione al condensatore, corrisponde alla pressione d'uscita del fluido dall'eiettore;

P_{eva} = Pressione all'evaporatore, corrisponde alla pressione d'ingresso del fluido secondario, è stata mantenuta inalterata (pari a 64220Pa)

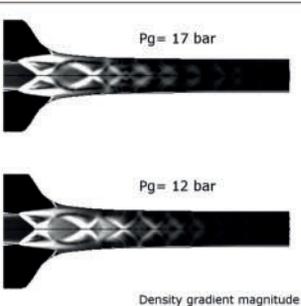


Al diminuire di P_g :



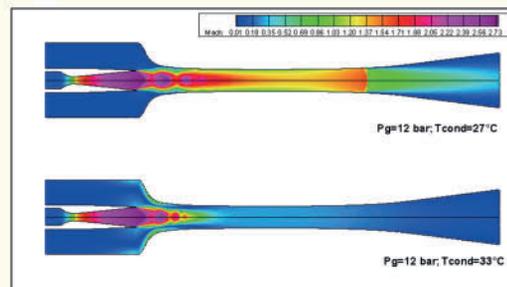
Diminuisce la quantità di moto e l'angolo di espansione del fluido primario

Diminuisce la portata del fluido secondario ma aumenta l'E.R., fino ad un valore massimo.



Andamento del treno di urti obliqui

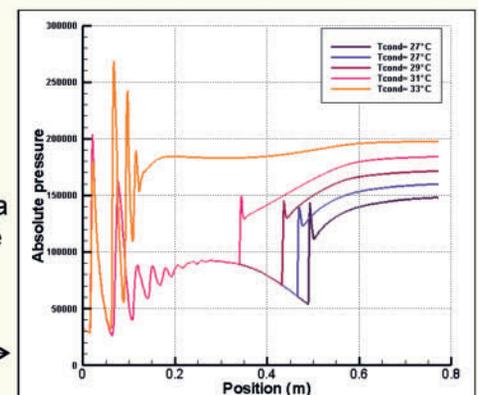
Al variare di P_{cond} :



Sono stati individuati tre regimi di funzionamento:

- CHOKED FLOW;
- UNCHOKED FLOW;
- REVERSED FLOW.

Andamento della pressione assoluta lungo la centerline dell'eiettore, per $P_g = 12$ bar



INGEGNERE

Niccolò Vanni

TITOLO TESI: *Ricostruzione tridimensionale della struttura spaziale della scena in opere d'arte pittoriche con prospettiva frontale*

RELATORE: Prof. Lapo Governi - Ing. Rocco Furferi - Ing. Yary Volpe

Obiettivo

Il lavoro di tesi qui presentato ha avuto come obiettivo lo sviluppo di tecniche innovative per la ricostruzione di forme tridimensionali a partire da immagini. Tali tecniche, applicabili in maniera automatica o semi-automatica, consentono di identificare, analizzare e classificare le eventuali “features” geometriche presenti in un'immagine ed organizzarne coerentemente la distribuzione spaziale in un modello tridimensionale rappresentativo della scena (od oggetto) raffigurata. I settori applicativi sono molteplici e vanno dai beni culturali (cultural heritage) alla progettazione industriale e di stile.

Per quanto riguarda i beni culturali, l'attività di ricerca è stata indirizzata allo sviluppo di tecniche per la ricostruzione di dipinti rinascimentali con prospettiva a singolo punto di fuga in forma di bassorilievi, al fine dell'esplorazione tattile da parte di soggetti non vedenti (progetto T-VedO, finanziato dalla Regione Toscana).

1. Inquadramento del tema trattato e del lavoro svolto

Per le persone non vedenti o con seri problemi alla vista, godere delle creazioni artistiche e degli heritage culturali non è immediato dal momento che questi “mondi visivi” sono quasi sempre creati da e per le persone normo-vedenti. Negli ultimi anni, tuttavia, alcuni progressi sono stati fatti per rendere più universale la partecipazione all'arte ed alla vita culturale

in genere. Nei musei sono nate a tal proposito apposite sezioni dedicate a persone con deficit visivi che raccolgono collezioni di oggetti adatti all'esplorazione tattile. La maggior parte di tali riproduzioni sono copie in scala di oggetti 3D, come sculture, manufatti archeologici, bassorilievi, monumenti, etc. Nella maggior parte dei casi si tratta di riproduzioni artistiche eseguite da artigiani e artisti utilizzando materiali classici quali gesso, creta, legno. Negli ultimi anni, tuttavia, tecnologie quali la scansione tridimensionale e la prototipazione rapida hanno fornito una notevole spinta nello sviluppo di riproduzioni tridimensionali (digitali e fisiche) di opere d'arte ed in particolar modo di sculture ed opere architettoniche.

L'esplorazione tattile risulta infatti la modalità principale con cui le persone non vedenti imparano a conoscere l'ambiente circostante. Il processo di manipolazione, unito alle sensazioni che questa provoca, è definito con il nome di “esplorazione aptica” (da greco haptomai: prendere, tenere, toccare con cura). (QUATRARO 2008; ALLEGRO 1991; GRASSINI, SCICILLONE 1997; GRASSINI 1998; SECCHI 2008).

Se la diffusione di musei tattili contenenti riproduzioni di statue ed elementi architettonici sta aumentando, non si può dire altrettanto per quello che riguarda le opere pittoriche. Per questo tipo di oggetti non sono infatti riscontrabili in letteratura studi per l'automatizzazione (o semi-automatizzazione) del processo di ricostruzione di modelli tattili. Questo aspetto è dovuto in gran parte al fatto che le soluzio-

ni tecnologiche utilizzate al fine della creazione di un oggetto 3D a partire da un'immagine 2D sono poche e di basso livello ed i criteri fino ad oggi utilizzati a tal proposito risultano spesso incompleti e frammentari.

Oltre a quanto appena detto, i criteri ed i metodi di “traduzione” in linguaggio tattile di immagini visive non sono ancora completamente codificati in ambito internazionale e le riproduzioni delle opere sono spesso realizzate manualmente da artisti e dunque molto dispendiose in termini di tempo e denaro. La mancanza di criteri standardizzati condivisi è testimoniata dalla presenza in letteratura di numerosi metodi per la creazione di modelli tattili a partire da dipinti. Fra questi quelli più diffusi sono quelli che convertono l'immagine in forma dei cosiddetti “diagramma tattili” o in forma di bassorilievo.

Con l'espressione “diagramma tattile” si intende la traduzione di una immagine in un linguaggio tattile che non coincide con l'esatta rappresentazione a rilievo dell'immagine visiva: questo può essere considerato piuttosto come una mappa che indica la composizione delle figure, differenziando ed evidenziando eventualmente alcuni aspetti formali ma anche distintivi (come, ad esempio, texture/colore, figure in primo piano/sfondo). Uno degli studi più significativi volto a definire buone pratiche per l'elaborazione di disegni a rilievo è stato quello condotto presso l'Università di Torino (LEVI 1993; LEVI; ROLLI 1994). Un altro riferimento importante a livello internazionale è quello fornito dalle linee guida della American Foundation for the Blind (KARDOULIAS 2003).



A differenza dei “diagrammi tattili”, la riproduzione in forma di bassorilievo, riproducendo le forme presenti nel dipinto con rilievi diversi a seconda della posizione nella scena, è in grado di fornire informazioni aggiuntive sulla profondità della scena stessa. In fig. 1 è riportato un esempio di diagramma tattile e di bassorilievo presenti nelle istituzioni sopra citate.

1.1 Analisi preliminare

In seguito ad una analisi degli studi presenti in letteratura e dei diversi approcci proposti per la traduzione in forma tattile di opere d'arte bidimensionali, risulta evidente che non esistendo criteri condivisi si rende necessario identificare le strategie di “traduzione” più efficaci.

Sulla base di quanto appena detto, si è dunque ritenuto necessario, preliminarmente allo sviluppo di una tecnica computer-based volta alla automatizzazione del processo di traduzione dell'opera pittorica in modello tridimensionale, valutare attraverso prove sperimentali quale fosse la tipologia di riproduzione più adatta. Questo obiettivo è stato perseguito realizzando un insieme di rappresentazioni tattili di due diversi dipinti e presentandole ad un gruppo di utenti non vedenti in modo da poter valutare il risultato ottenuto in termini di percezione dell'opera. Sono stati dunque selezionati due dipinti interpretanti il soggetto iconografico della “natura morta” eseguiti da due grandi maestri del '900: Fernando Botero (1932) e Giorgio Morandi (1890 – 1964).

Per ogni opera sono state realizzate quattro diverse rappresentazioni tattili (due diagrammi tattili e due pseudo-bassorilievi):

- il contorno in rilievo, dove gli oggetti raffigurati nei dipinti sono rappresentati per mezzo di linee in rilievo in corrispondenza dei contorni degli oggetti stessi;
- il pattern testurizzato, simile al precedente, ma in cui ciascun oggetto raffigurato è caratterizzato da una differente testurizzazione in rilievo;
- il bassorilievo a strati piatti, dove ciascun oggetto raffigurato è rappresentato da uno strato piatto posto ad un'altezza opportuna rispetto allo sfondo;
- il bassorilievo vero e proprio.

◀ Fig. 1 – In alto: esempio di diagramma tattile (Peter Paul Rubens, *La raccolta della manna*); in basso: esempio di bassorilievo (Sandro Botticelli, *Nascita di Venere*)²

In fig. 2 e in fig. 3 sono raffigurate sia le opere selezionate, che le relative rappresentazioni tattili.

Le opere sono state presentate ad un campione di persone non vedenti costituito da 14 soggetti con cecità congenita (8 soggetti) oppure acquisita (6 soggetti) divisi in 2 fasce di età: 25-47 anni (7 soggetti) e 54-73 anni (sette soggetti).

1.2 Metodologia generale

Come discusso nei paragrafi precedenti il metodo di “traduzione in linguaggio tattile di immagini visive” che risulta maggiormente leggibile dalle persone con deficit visivo risulta essere il bassorilievo.

A partire da tali considerazioni è stato sviluppato un nuovo approccio al problema basato sull'implementazione di un procedimento semi-automatico per la ricostruzione della struttura spaziale della scena in opere d'arte pittoriche, con particolare riferimento alle rappresentazioni in prospettiva frontale tipiche del Rinascimento italiano. Impiegando tecniche computer-based (tecniche di elaborazione dell'immagine e tecniche di Computer Vision), la scena dipinta dall'artista è trasformata in un modello 2.5 dimensionale, ovvero un modello in 3 dimensioni privo di sottosquadri, in cui le parti non in vista non vengono modellate. Nel caso di modelli tattili, questo tipo di rappresentazione 2.5D risulta molto utile e significativa, al contrario per esempio di una ricostruzione in scala della scena completamente in 3 dimensioni.

Una rappresentazione 2.5D può essere dunque ottenuta da una singola immagine pittorica purché vi siano presenti indicazioni riguardo alla collocazione spaziale degli elementi nella scena: tali indicazioni possono essere dedotte dallo studio della prospettiva. Nel presente lavoro, in particolare, viene affrontato lo studio di dipinti a prospettiva semplice (o a singolo punto di fuga).

La costruzione prospettica sarà infine percepibile anche nel modello tattile finale, grazie alla riproduzione delle deformazioni geometriche a questa dovute. Ciò risulta di particolare rilevanza considerando che, nel caso di utenti con deficit visivo congenito, il concetto di prospettiva non può essere capito ed esplorato se non attraverso la percezione aptica.

Lo strumento sviluppato è stato applicato a due casi studio di particolare importanza nel territorio fiorentino. Il primo caso selezionato è stato l'affresco intitolato *Guarigione dello Storpio e Resurrezione di*

▼ Fig. 2 – A sinistra: Fernando Botero, *Natura morta con frutta* (1989)³; a destra: 1. contorno in rilievo, 2. pattern testurizzato, 3. bassorilievo a strati piatti e 4. bassorilievo



▲ Fig. 3 – A sinistra: Giorgio Morandi, *Natura morta I*; a destra: 1. contorno in rilievo, 2. pattern testurizzato, 3. bassorilievo a strati piatti e 4. bassorilievo

Tabita di Masolino da Panicale, situato nella Cappella Brancacci nella basilica di Santa Maria del Carmine a Firenze. L'opera, di dimensioni pari a circa 6x2,6 m, è databile attorno al 1424-1425 e ritrae due miracoli di San Pietro (Atti degli Apostoli III, 1-10 e IX, 36-41).

La scelta del secondo caso studio, è invece ricaduta sull'*Annunciazione* (detta del “Corridoio Nord”) dipinta dal Beato Angelico tra il 1440 ed il 1450 e situata nel Convento di San Marco a Firenze, che rappresenta indubbiamente una delle più apprezzate e conosciute opere dell'artista toscano.

1.3 Procedura di creazione del modello

La modalità con la quale un'immagine bidimensionale viene tradotta in un bassorilievo, o più precisamente in un'immagine 2.5D a sagome piatte, viene qui sommariamente introdotta facendo riferimento al primo caso studio (*Guarigione dello Storpio e Resurrezione di Tabita*). Per ulteriori chiarimenti si rimanda a CARFAGNI ET AL. 2012, VOLPE ET AL. 2013.

1 Dal sito <http://www.artbeyondsight.org/handbook/acs-tactileguidelines.shtml>.

2 Dal sito http://www.uicfirenze.it/uic/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=127.

3 Dal sito <http://www.settemuse.it>.

4 Dal sito <http://arteposter.it>.



◀ Fig. 4 – In alto a sinistra: immagine acquisita dell'affresco *Guarigione dello Storpio e Resurrezione di Tabita* (Masolino da Panicale, Cappella Brancacci, basilica di Santa Maria del Carmine a Firenze); in alto a destra: immagine contro-distorta; in basso: immagine rettificata e tagliata

Si possono individuare 3 fasi principali, delle quali la seconda rappresenta la procedura innovativa sviluppata durante il lavoro di tesi.

Fase 1. Acquisizione ed elaborazione dell'immagine acquisita;

Fase 2. Ricostruzione del bassorilievo a forme piate utilizzando le informazioni derivanti dalla sola prospettiva;

Fase 3. Conversione del modello virtuale in un modello fisico tramite macchine di prototipazione rapida.

L'acquisizione dell'immagine (Fase 1) si esegue generalmente utilizzando una camera ad alta risoluzione; utilizzando successivamente tecniche note dell'immagine processing volte ad eliminare sia l'aberrazione ottica dovuta alle imperfezioni delle lenti che la distorsione prospettica.

La fase di ricostruzione spaziale (Fase 2) prevede una serie di operazioni schematizzabili come di seguito elencato:

- a. segmentazione preliminare dell'immagine acquisita in cluster (sviluppando un approccio ibrido ed interattivo basato su metodi di "Watershed segmentation" e "Mortensen's livewire") e classificazione degli oggetti rappresentati (BARRETT, MORTENSEN 1997; ZIOU, TABBONE 1998);
- b. individuazione del punto di fuga prospettico nell'immagine;
- c. posizionamento nello spazio dei segmenti individuati;
- d. ricostruzione della height map sfruttando le informazioni ricavate dall'analisi della prospettiva;
- e. ricostruzione della superficie a partire dalla height map;

- f. conversione della superficie in mesh triangolare solida (file STL).

Per quanto riguarda la costruzione della height map l'algoritmo innovativo sviluppato durante il lavoro di tesi permette di effettuare in maniera semi-automatica la separazione dei soggetti presenti nel dipinto (figure ed elementi architettonici) ed assegnare, a ciascuno di essi, un certo valore di profondità, rispetto al piano di sfondo. Tale profondità è rappresentata da un certo livello di grigio assegnato all'elemento relativo su di un'immagine sintetica.

Durante la terza ed ultima fase il modello virtuale può essere convertito in un modello fisico tramite l'impiego di macchine di prototipazione rapida o di comuni frese a controllo numerico al fine di renderlo fruibile ai non vedenti.

2. Grado di innovazione dei risultati ottenuti

Grazie ai risultati dello studio qui presentato si può concludere che risulta possibile semplificare drasticamente le fasi di realizzazione di bassorilievi tattili mediante impiego di una procedura sistematica guidata dall'utente. Il grado di automatizzazione della procedura e la sua relativa semplicità consentono infatti l'utilizzo di questo metodo anche ad utenti non specializzati. Tutto ciò può trovare applicazione, ad esempio, nei contesti museali, qualora il numero di opere da "tradurre" in modelli tattili risulti consistente e vi sia la necessità di ridurre costi e tempi di produzione. Un aumento in questo senso della "produttività" di modelli per esplorazione aptica ridurrebbe la necessità di avvalersi di scultori specializzati per tali operazioni di traduzione, contrariamente a quella che è invece la prassi attuale.

3. Possibile impatto applicativo dei risultati ottenuti

I risultati ottenuti indicano inoltre come tale procedura offra ampie opportunità di applicazione, concretizzabili soprattutto in due settori, ovvero quello relativo ai beni culturali e quello, più propriamente ingegneristico, della progettazione industriale e di stile.

Come già ampiamente descritto il settore del cultural heritage è quello entro il quale il metodo si è svi-

luppato e che potrà beneficiare di sviluppi concreti ed immediati. A tal proposito si rileva come la procedura descritta, dalla quale si ottengono bassorilievi a sagome piatte, sia attualmente in fase di espansione ed integrazione con tecniche di Shape From Shading (presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze) al fine di ottenere le forme arrotondate (ovvero i volumi interi) tipiche del bassorilievo vero e proprio. Gli algoritmi di Shape From Shading permettono infatti di ricostruire forme tridimensionali a partire dall'ombreggiatura rappresentata nel dipinto. Queste si dimostrano particolarmente efficaci nel caso di texture tridimensionali complesse (rappresentazioni di volti umani, di capitelli o panneggi) ma inadatte a replicare con fedeltà le distribuzioni spaziali degli elementi del dipinto, eseguite invece con buon risultato dalla procedura qui presentata, basata sull'analisi della prospettiva. Tali caratteristiche rendono questi metodi complementari e mostrano risultati del tutto incoraggianti. In fig. 4 sono visibili un dettaglio dell'affresco e la superficie ottenuta grazie alla combinazione dei due metodi.

Per quanto concerne il settore industriale, la procedura può trovare applicazione nei casi in cui il progetto non nasca direttamente in ambiente CAD ma da disegni e bozzetti di stile realizzati a mano, come frequentemente accade in fase di ideazione ed impostazione preliminare del prodotto. In tali casi è possibile semplificare la fase di trasferimento del progetto dal foglio di carta all'ambiente virtuale, in modo da poter disporre di un modello numerico preparatorio da utilizzare nelle successive fasi di sviluppo, progetto e produzione.

Il passaggio automatico da schizzi e bozzetti (solitamente rappresentati in più viste ortogonali) a modelli 3D è un problema già noto ed investigato in letteratura scientifica (GOVERNI ET AL. 2013; FURFERI ET AL. 2011) e si sviluppa generalmente in due fasi principali distinte: una prima fase in cui avviene il passaggio dai disegni 2D ad un modello wireframe 3D ed una seconda fase in cui viene definito un set di superfici che "chiudono" il wireframe, conferendo l'aspetto tridimensionale vero e proprio. Non essendo ad oggi la giacitura di tali superfici risolvibile in maniera automatica, i risultati di tale lavoro indicano la possibile applicazione della metodologia al fine di determinare la sistemazione di tali superfici in maniera automatica e completare il modello wireframe sopra

citato. Per realizzare questo obiettivo, come già detto a proposito del settore dei beni culturali, dovranno essere integrati anche gli studi sugli algoritmi di Shape From Shading (SFS) attualmente in corso presso il Dipartimento stesso.

4. Rilevanza scientifica dei risultati ottenuti

Sebbene esistano in letteratura numerosi metodi per la conversione di immagini dimensionali in modelli 3D (CRIMINISI ET AL. 2000; STURM ET AL. 1999) si rileva la carenza di metodi che trattino in particolare della creazione bassorilievi a partire da dipinti. Si fa notare inoltre come i rari metodi esistenti per creazione di bassorilievi a partire da immagini siano insufficienti ed incompleti per quanto riguarda il grado di automatizzazione e fedeltà all'opera pittorica di partenza, necessitando di operazioni di post-processamento dei risultati, superiori a quanto avviene utilizzando il metodo qui presentato (REICHINGER ET AL. 2012).

È utile dunque sottolineare come l'approccio utilizzato risulti essere innovativo, in particolare constatando che ad oggi non è mai stato proposto in letteratura scientifica alcuno studio basato sull'analisi della prospettiva al fine della ricostruzione spaziale della scena.

I risultati ottenuti sono stati oggetto di un articolo scientifico pubblicato su un'importante rivista internazionale⁵.

Altri articoli inerenti allo sviluppo della procedura qui presentata sono già in fase di redazione presso il gruppo di ricerca guidato dalla Prof. Monica Carfagni presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze.

⁵ R. Furferi, L. Governi, Niccolò Vanni, Yary Volpe (2014). *Tactile 3D bas-relief from single-point perspective paintings: a computer based method*, Journal of Information and Computational Science, vol. 11(16), pp. 5667-5680. Oltre a questo articolo, inoltre, ne sono stati pubblicati altri due in cui si parla di questa metodologia: L. Governi, R. Furferi, Y. Volpe, L. Puggelli, N. Vanni (2014). *Tactile exploration of paintings: an interactive procedure for the reconstruction of 2.5D models*, in: 22nd IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Palermo, June 16-19 2014, pp. 14-19; R. Furferi, L. Governi, Y. Volpe, L. Puggelli, N. Vanni, M. Carfagni (2014). *From 2D to 2.5D i.e. from painting to tactile model*, Graphical Models, vol. onlinefirst, pp. 1-14.

INGEGNERE IUNIOR

Matteo Galanti

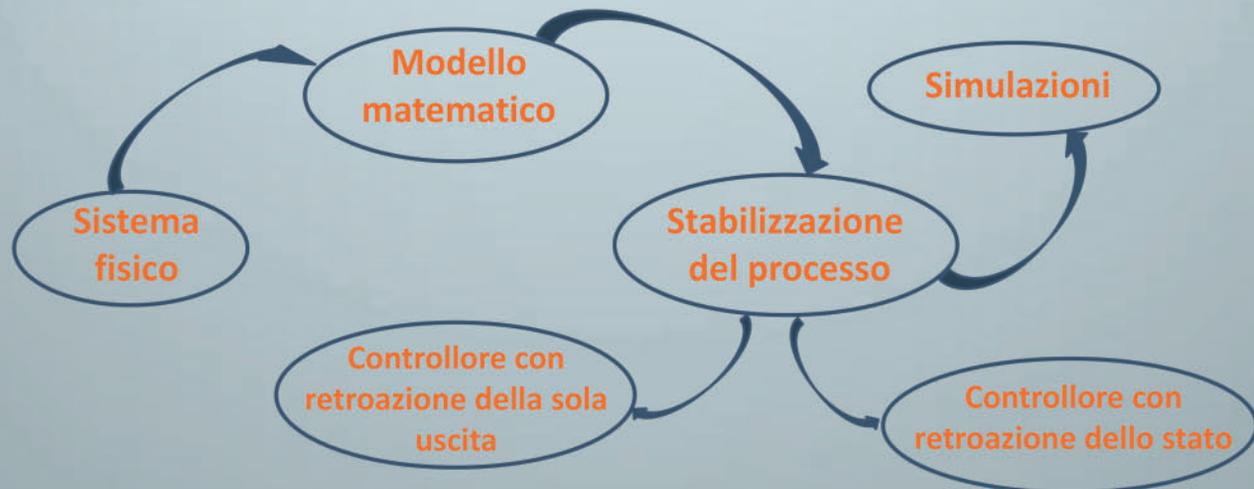
TITOLO TESI: *Modellizzazione e stabilizzazione di un veicolo a due ruote monoassiale*

RELATORE: Prof. Michele Basso

IN QUESTA TESI è stato preso in considerazione un sistema meccanico molto simile al ben noto Segway, ovvero un veicolo con due ruote poste su un unico asse capace di trasportare una persona. Questo veicolo è stato inventato nel 2001 da Dean Kamen e negli ultimi anni ha conosciuto una larga diffusione. Infatti è un mezzo di trasporto elettrico di piccole dimensioni che permette di muoversi agilmente anche in spazi stretti ed affollati, come ad esempio le città. Questo sistema meccanico in prima approssimazione è assimilabile ad un pendolo inverso, quindi è un sistema fortemente instabile: per questo motivo è stato necessario elaborare un'opportuna strategia di controllo che permettesse di mantenere la posizione di equilibrio verticale in tutte le situazioni che si possono presentare nell'uso comune. Il primo obiettivo è stato quello di introdurre un modello matematico capace di descrivere in modo adeguato il sistema. Per fare ciò è stata presa in considerazione una schematizzazione del sistema originale, che presenta due parti fondamentali: le due ruote e la parte superiore, che comprende a sua volta il manubrio e la persona trasportata. Per determinare in modo univoco la configurazione di questo schema semplificato basta conoscere l'inclinazione Θ_c della parte superiore rispetto alla verticale, la velocità angolare della parte superiore $\dot{\Theta}_c$, l'angolo Θ_r individuato dalla rotazione delle ruote rispetto ad un riferimento iniziale e la velocità angolare delle ruote $\dot{\Theta}_r$. Chiaramente queste quattro grandezze sono state scelte anche per definire lo stato del sistema. Come ingresso del sistema è stata scelta la coppia T_m che i motori (quasi sempre motori elettrici alimentati tramite batterie) forniscono alle ruote, mentre come

uscita la scelta naturale è stata quella di considerare l'inclinazione Θ_c . Infatti il movimento in avanti o indietro non viene comandato direttamente, ma è solo una conseguenza della ricerca dell'equilibrio verticale: se il conducente si sbilancia in avanti il veicolo per ritrovare la posizione verticale dovrà accelerare in avanti, mentre se si sbilancia all'indietro il veicolo dovrà decelerare. Prima di trovare un modello matematico sono state introdotte alcune ipotesi semplificative: la superficie su cui deve muoversi il veicolo è stata considerata piana e liscia, la traiettoria è stata supposta rettilinea (in seguito è stata mostrata anche una possibile strategia per mantenere il controllo anche lungo traiettorie curve) e si sono trascurati i possibili effetti della postura della persona trasportata sulla risposta del veicolo. A questo punto scrivendo le equazioni cardinali relative alla schematizzazione e inserendo dei valori numerici ragionevoli è stato possibile ricavare un modello del sistema, ovviamente non lineare. Questo modello, anche se semplificato, permette di capire in che modo funziona il veicolo e soprattutto in che modo risponde agli ingressi e ai disturbi esterni. Dal momento che alla partenza e durante il suo normale funzionamento questo veicolo resta in un intorno della posizione verticale è risultato ragionevole considerare una linearizzazione del modello matematico sopra descritto nell'intorno di tale posizione ($\Theta_c = 0$). Ovviamente il modello linearizzato risulta una buona approssimazione del modello completo solo "nelle vicinanze" della posizione verticale, mentre introduce errori sempre maggiori man mano che ci si discosta da tale configurazione. Considerando il modello lineare e passando nel domi-

Modellizzazione e stabilizzazione di un veicolo a due ruote monoassiale



Vettore di stato: $\mathbf{x} = [\theta_c \quad \dot{\theta}_c \quad \theta_r \quad \dot{\theta}_r]^T$

Equazioni cardinali:

$$\begin{cases} T_m = F R + J_r \ddot{\theta}_r \\ -T_m + M_c g h \sin(\theta_c) = J_c \ddot{\theta}_c + M_c h \cos(\theta_c) \ddot{x}_g - M_c h \sin(\theta_c) \ddot{z}_g \\ F = (M_c + M_r) \ddot{x}_g \\ N - (M_c + M_r) g = (M_c + M_r) \ddot{z}_g \end{cases}$$

↓

Linearizzando nell'intorno dell'equilibrio si può ottenere un modello approssimato più semplice da studiare

Il sistema è chiaramente instabile ed il movimento è una conseguenza della ricerca dell'equilibrio: infatti se il conducente si sbilancia in avanti il veicolo dovrà accelerare per mantenere la verticalità, mentre se lo sbilanciamento è all'indietro dovrà decelerare.

Controllo con retroazione della sola uscita

$$G(s) = \frac{\Theta_c(s)}{T_m(s)} = -\frac{J_r + M_r R^2 + h R M_c}{(J_c M_r R^2 + J_c J_r + h^2 M_c J_r) s^2 - M_r M_c g h R^2 - M_c g h J_r}$$

Inserendo valori numerici ragionevoli e progettando il controllore con la tecnica del luogo delle radici si ottiene:

$$G(s) = \frac{-0,044}{s^2 - 7,939} \quad C(s) = -3000 \frac{s + 2}{s + 12}$$

Risultati delle simulazioni:

Andamento dell'inclinazione della parte superiore partendo da tre diverse condizioni iniziali.

Andamento della velocità angolare delle ruote partendo da tre diverse condizioni iniziali.

Conclusioni

- **Vantaggi:** Si riesce a stabilizzare il sistema e a garantire una guida molto semplice e intuitiva.
- **Svantaggi:** Non si può imporre a priori uno spostamento o la velocità angolare delle ruote.

Controllo con retroazione dello stato

$$u = F \cdot (x - x_0)$$

Considerando la rappresentazione di stato del sistema linearizzato e progettando il vettore dei guadagni F in modo che il sistema ad anello chiuso sia stabile si ottiene:

$$F = [1554, 1101, 89, 147]$$

Risultati delle simulazioni:

Andamento delle grandezze di interesse nel caso in cui venga imposto uno spostamento predeterminato.

Andamento delle grandezze di interesse nel caso in cui venga imposta la velocità di avanzamento.

Conclusioni

- **Vantaggi:** Si riesce a stabilizzare il sistema e si può imporre a priori uno spostamento o la velocità angolare delle ruote.
- **Svantaggi:** Nella realtà questa soluzione non è praticabile in quanto non si può avere sempre a disposizione uno stato di riferimento per definire gli obiettivi della guida.

nio di Laplace, è possibile trovare la funzione di trasferimento che lega l'ingresso, cioè la coppia fornita dai motori alle ruote, all'uscita, ovvero l'inclinazione della parte superiore rispetto alla verticale. Questa funzione di trasferimento, chiamata $G(s)$, è del secondo ordine e presenta quindi due poli, uno a parte reale positiva e uno a parte reale negativa. Il polo a parte reale positiva rende instabile il sistema, per cui è stato necessario progettare un controllo per mantenere verticale il veicolo. In particolare sono stati presi in considerazione due tipi di controllo: il classico controllo lineare che si basa sulla retroazione dell'uscita Θ_c e un controllo tramite regolatore che si basa sulla retroazione di tutto lo stato. La prima soluzione risulta molto semplice da progettare e da implementare ed è applicabile con successo in tutte le situazioni di interesse in cui si può trovare il veicolo. Con la seconda soluzione invece si riesce a controllare non solo l'uscita Θ_c (cioè l'inclinazione della parte superiore rispetto alla verticale), ma anche tutte le altre componenti dello stato, per cui ad esempio essa permette di imporre un certo avanzamento noto oltre naturalmente a garantire la verticalità. Questa seconda soluzione in generale permette di ottenere prestazioni leggermente migliori in quanto in retroazione si utilizza non una sola grandezza ma tutto lo stato. Tuttavia nella realtà questa soluzione è difficilmente applicabile, in quanto si dovrebbe avere sempre a disposizione uno stato di riferimento per generare l'ingresso di controllo, mentre la stabilizzazione tramite controllore lineare si preoccupa solo di mantenere la verticalità, per cui è applicabile sempre senza particolare impegno da parte del conducente. Una volta progettati i due controlli, sono state effettuate delle simulazioni utilizzando Simulink per avere conferma del corretto funzionamento. In particolare tramite uno schema a blocchi si è costruito su Simulink lo schema relativo al modello completo (cioè non linearizzato) del veicolo e sono state effettuate delle simulazioni inserendo nel loop di controllo i due controlli progettati tramite il modello linearizzato, confidando nel fatto che se si lavora in un intorno della posizione di equilibrio, l'errore introdotto dalla linearizzazione è trascurabile. Per quanto riguarda il controllore lineare sono state simulate le situazioni di interesse, considerando lo sbilanciamento che può introdurre il conducente come un disturbo additivo che si inserisce nel loop di controllo sommandosi alla

coppia fornita dai motori. Ad esempio è stato analizzato il comportamento nel caso in cui l'inclinazione iniziale sia diversa da zero e nel caso in cui il conducente introduca un disturbo sbilanciandosi in avanti o indietro. In tutti i casi i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti, con risposte rapide e precise. In seguito è stato simulato anche il comportamento nel caso di controllo realizzato mediante retroazione dello stato e si è verificato che effettivamente si riesce a seguire correttamente uno stato di riferimento arbitrario, per cui si può imporre che il veicolo si muova avanti o indietro di una certa distanza o che si muova con una certa velocità angolare delle ruote. Anche in questo caso le risposte sono state soddisfacenti. In seguito sono stati analizzati i sensori e gli attuatori che potrebbero essere utilizzati in un veicolo come quello sotto esame. Per quanto riguarda i sensori sono stati analizzati giroscopi, accelerometri e sensori di posizione angolare, che permettono di determinare la posizione angolare delle ruote, l'inclinazione della parte superiore rispetto alla verticale e la velocità di rotazione delle ruote e della parte superiore; inoltre si è mostrato come sia possibile una misura più robusta dell'inclinazione della parte superiore rispetto a vibrazioni casuali utilizzando in modo combinato un accelerometro e un giroscopio. Utilizzando questa particolare configurazione, infatti, si può misurare l'inclinazione della parte superiore eliminando i contributi legati a vibrazioni casuali che per esempio possono essere dovute al terreno sconnesso e che non portano alcuna informazione aggiuntiva, ma anzi costituiscono un vero e proprio disturbo. Per quanto riguarda gli attuatori è stato considerato che spesso questi veicoli sono alimentati attraverso due motori in corrente continua (uno per ruota), per cui è stato presentato il motore brushed DC, cioè il motore in corrente continua con spazzole, con particolare attenzione al modello e alle caratteristiche basilari che legano coppia e velocità di rotazione. Da notare il fatto che questi motori necessitano di una costante e frequente manutenzione, dovuta proprio alla degradazione legata ai contatti striscianti. Al contrario, i motori brushless non hanno contatti striscianti e quindi non hanno bisogno di una manutenzione continua, infatti l'operazione di commutazione che nei motori brushed viene effettuata dal collettore, in questo caso viene eseguita da una particolare elettronica di controllo. Infine sono stati presentati i limiti dello

studio effettuato ed è stato mostrato un possibile schema di controllo per un veicolo a due ruote monoassiale capace di affrontare traiettorie curvilinee mantenendo l'equilibrio verticale. In questi veicoli per curvare è necessario inclinare il manubrio nella direzione in cui si vuole virare, per cui è stato proposto uno schema di controllo in cui oltre a garantire la verticalità si impone che la differenza di velocità tra le due ruote e quindi il raggio della traiettoria curvilinea siano proporzionali all'inclinazione del manubrio. Alla luce dei risultati si può dire che entrambi i controlli proposti permettono di stabilizzare il sistema, ottenendo buone prestazioni in termini di precisione e rapidità di risposta. Tuttavia il controllo con retroazione dello stato, pur stabilizzando correttamente il sistema, risulta difficilmente applicabile nella pratica, in quanto è quasi sempre impossibile avere a disposizione uno stato di riferimento. Il controllo lineare con retroazione della sola uscita invece garantisce un controllo più naturale da parte del conducente: infatti questo controllo non necessita di uno stato di riferimento, ma si preoccupa esclusivamente di mantenere la posizione verticale. Per questo motivo il conducente può pilotare il veicolo in modo molto intuitivo, inclinandosi in avanti o indietro per accelerare o decelerare: il movimento desiderato sarà una conseguenza diretta della ricerca dell'equilibrio.

Considerando la rapidità e la capillarità con cui si è diffuso questo veicolo in pochi anni (anche in Italia nelle grandi città è molto utilizzato sia da turisti che da vigili urbani o agenti di polizia) questo studio pone le basi per lo sviluppo di un mezzo di trasporto che indubbiamente presenta molti pregi; infatti è molto comodo, può essere guidato con estrema facilità da chiunque e siccome è un veicolo elettrico molto leggero costituisce una valida alternativa per combattere l'inquinamento atmosferico. La trattazione descritta in precedenza fornisce una solida base di partenza per lo studio di questo mezzo di trasporto. Sono state messe in evidenza tutte le peculiarità di questo sistema e sono stati analizzati tutti i comportamenti caratteristici; in particolare oltre alla forte instabilità sono stati descritti il principio di funzionamento e il comportamento nei casi di interesse pratico. Inoltre i

risultati ottenuti non sono importanti solo dal punto di vista teorico ma possono avere anche un notevole risvolto pratico: infatti questo studio può essere utile per comprendere e controllare non solo questo particolare veicolo, ma anche tutta una classe di sistemi fisici assimilabili in prima approssimazione ad un pendolo inverso, come per esempio il corpo umano. Per questo motivo sono state studiate sia le caratteristiche intrinseche del processo fisico sia due possibili approcci per il controllo, evidenziando pregi e difetti di entrambi. I risultati ottenuti sono frutto di uno studio basato sul metodo scientifico, infatti dopo aver inquadrato il problema sono state introdotte alcune ipotesi e alcune semplificazioni ragionevoli, e dopo aver proposto delle soluzioni al problema di controllo sono stati analizzati i risultati delle simulazioni con spirito critico, cercando di sottolineare in ogni caso i risultati e i comportamenti più importanti. Inoltre in ogni frangente si è sempre cercato di capire in che modo e in che misura le ipotesi introdotte influenzassero le simulazioni. In definitiva si può dire che le ipotesi introdotte semplificano molto lo studio, ma che in vista di un'ipotetica realizzazione pratica non compromettono la validità dei risultati. In conclusione, quindi, risulta chiaro che la grande novità introdotta da questa tipologia di veicoli, che in un certo senso rivoluzionano il modo di concepire un mezzo di trasporto, è il fatto che, a differenza di ciò che si potrebbe pensare, prendendo in considerazione un sistema intrinsecamente instabile e applicando un'opportuna legge di controllo è possibile ottenere un veicolo completamente differente da quelli che sono i veicoli tradizionali, con caratteristiche impensabili per i sistemi completamente stabili. Infatti il progetto di un veicolo stabile, come per esempio un triciclo, sarebbe stato estremamente più semplice, ma non avrebbe portato nessuna innovazione nel modo di guidare e non avrebbe garantito prestazioni diverse da quelle dei mezzi tradizionali. Un veicolo a due ruote monoassiale, invece, complica le cose dal punto di vista del controllo e aumenta le difficoltà in fase di progetto, ma semplifica molto la vita al conducente, garantendo una grande agilità in ogni situazione e una guida molto semplice.

INGEGNERE IUNIOR

Davide Miceli

TITOLO TESI: *Controllo ottimo lineare-quadratico applicato ad una sospensione semiattiva sky-hook*

RELATORE: **Prof. Luigi Chisci**

IL SISTEMA SOSPENSIVO di un'autovettura rappresenta l'organo di connessione fra pneumatici e scocca del veicolo ed ha l'obiettivo principale di mantenere sospeso l'abitacolo sulle ruote smorzando le eventuali oscillazioni verticali. Tale sistema, composto da elementi elastici e smorzanti, deve essere in grado di:

- assorbire le irregolarità del fondo stradale al fine di ridurre l'accelerazione verticale subita dalla vettura;
- assicurare una sufficiente forza di contatto col terreno.

La prima richiesta corrisponde ad una specifica di comfort e implica una sospensione caratterizzata da una rigidità contenuta, mentre la seconda specifica, legata al miglioramento dell'aderenza e della guidabilità in curva, implica una sospensione con una rigidità elevata. Una vettura con una sospensione più rigida garantisce una maggiore prontezza e reattività alla guida, essendo in grado di minimizzare le deformazioni e i ritardi nella risposta alle sollecitazioni fornite dallo sterzo, ma aumenta l'entità delle accelerazioni trasmesse dagli pneumatici all'abitacolo peggiorando il comfort. Al contrario, una vettura con una sospensione più morbida garantisce accelerazioni verticali minime, ma può creare oscillazioni potenzialmente in grado di compromettere la tenuta di strada a causa delle elevate fluttuazioni della forza di contatto col terreno. Risulta quindi evidente che le due specifiche sono tra loro in contrasto e non è possibile soddisfarle entrambe. Per questi motivi le sospensioni sono progettate in modo da trovare il miglior compromesso in base al campo di applicazione: ad esempio in una utilitaria è ragionevole

privilegiare il comfort rispetto alle prestazioni, mentre in una vettura sportiva o da competizione si cercano le migliori prestazioni a scapito del comfort.

Il problema della scelta del miglior compromesso in termini di rigidità della sospensione passiva ha portato allo studio di tipologie di sospensioni regolabili come le sospensioni attive e semi-attive. Il sistema di sospensioni attive è caratterizzato dalla presenza di un attuatore (tipicamente idraulico) in parallelo all'elemento elastico in grado di fornire una forza smorzante determinata da un opportuno sistema di controllo. Le sospensioni semi-attive sono composte da ammortizzatori a smorzamento variabile gestiti da un opportuno controllore.

Questa tesi si pone dunque l'obiettivo di progettare un sistema di controllo da applicare alle classi di sospensioni attive e semi-attive per studiarne il comportamento attraverso delle simulazioni. Si utilizza la tecnica di controllo ottimo che ben si adatta a questa tipologia di problemi in quanto consente di trovare il sistema di controllo che minimizza un opportuno funzionale di costo in funzione di alcuni coefficienti di peso scelti in base alle specifiche di comfort e guidabilità da soddisfare.

In particolare lo studio si sofferma sull'implementazione della legge di controllo ottima su una particolare sospensione semi-attiva, che prende il nome di sospensione Skyhook, caratterizzata da:

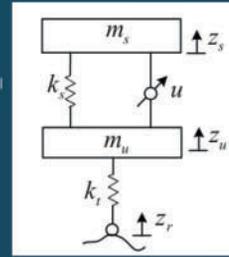
- uno smorzatore viscoso che genera una forza proporzionale alla velocità assoluta della massa sospesa (anziché proporzionale alla velocità relativa tra massa sospesa e massa non sospesa);

Controllo ottimo LQ applicato a una sospensione semi-attiva Skyhook

Modello



Quarter-car model



Equazioni del moto:

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - u$$

$$m_u \ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - z_r) + u$$

Equazioni di stato:

$$x = [\dot{z}_s, \dot{z}_u, (z_s - z_u), (z_u - z_r)]^T$$

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew, \quad w = \dot{z}_r$$

$$y = Cx$$

Controllo ottimo



$$J_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \dot{z}_s^2 dt$$

$$J_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (z_s - z_u)^2 dt$$

$$J_3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (z_u - z_r)^2 dt$$

$$J_4 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$$

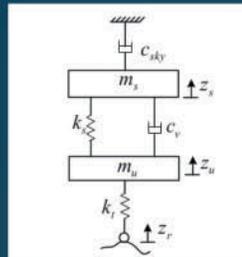
Funzionale di costo da minimizzare:

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 + r J_4$$

Sceita dei fattori di peso w_1, w_2, w_3 e r in base alle specifiche di comfort, guidabilità in curva e consumi richieste

$$u^* = F^* x \quad \text{Legge di controllo ottima}$$

Sospensione semi-attiva Skyhook

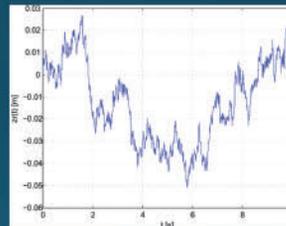


$$u_{sky} = c_{sky} \dot{z}_s + c_v (\dot{z}_s - \dot{z}_u) = F_s H x$$

Soluzione ai minimi quadrati

$$\min_{F_s} \|F_s H - F^*\|^2 \rightarrow F_s = F^* H^T (H H^T)^{-1}$$

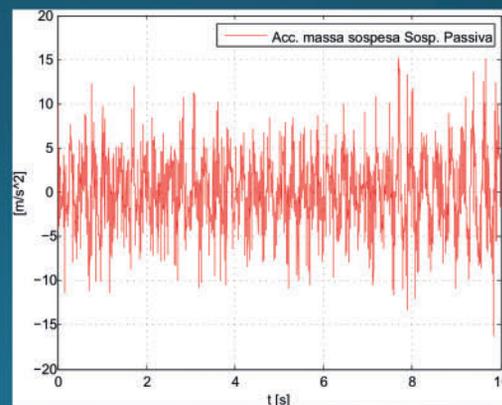
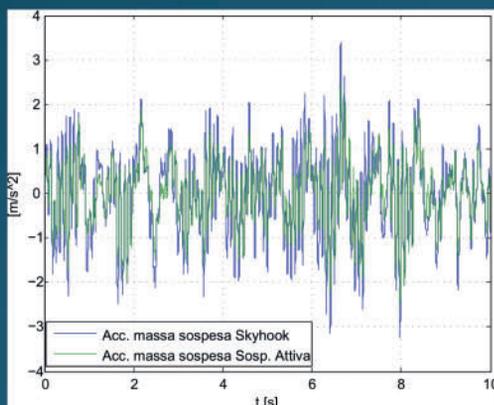
$$u_{sky} = F^* H^T (H H^T)^{-1} H x \quad \text{Legge di controllo sub-ottima}$$



Profilo di strada dissestata utilizzato per le simulazioni

Simulazioni

Simulazione con fattori di peso scelti in modo da realizzare un Assetto Comfort



Risultati

✓ La sospensione semi-attiva Skyhook, pur rappresentando una soluzione sub-ottima al problema di controllo, rappresenta il miglior compromesso fra prestazioni e costi.

- un ammortizzatore con coefficiente di smorzamento regolabile tipico di una sospensione semi-attiva.

Questa configurazione consente idealmente di isolare dal profilo stradale la massa sospesa, come se fosse “agganciata al cielo”, ottenendo una netta diminuzione delle vibrazioni trasmesse all’abitacolo e, quindi, un miglioramento in termini di comfort.

Per la determinazione del modello matematico che esprime la dinamica delle sospensioni si fa riferimento al modello Quarter-Car che descrive la dinamica verticale di un quarto di veicolo: la vettura è divisa in quattro sezioni modellate separatamente trascurando le mutue interazioni. Il modello rappresenta tutti gli elementi connessi rigidamente alla scocca della vettura (telaino, carrozzeria e tutte le parti meccaniche in essa contenute) con una massa sospesa m_s e gli elementi connessi elasticamente alla vettura (pneumatici, freni, mozzi) attraverso una massa non sospesa m_u . La sospensione è modellata attraverso un elemento elastico di rigidità k_s ed una forza di controllo u la cui espressione dipende dal tipo di sospensione utilizzata (passiva, attiva, semi-attiva). Si modella lo pneumatico attraverso una costante elastica k_r . Questo modello risulta valido, in particolare, in condizioni di accelerazioni modeste e marcia rettilinea in quanto trascura i moti di rollio, beccheggio e imbardata.

Si ottiene dunque un modello lineare che può essere scritto sotto forma di equazioni di stato, dove lo stato è definito come segue

$$x = [z_s, z_u, (z_s - z_u), (z_u - z_r)]^T$$

dove z_s è la velocità della massa sospesa, z_u è la velocità della massa non sospesa, $(z_s - z_u)$ è l’estensione dell’ammortizzatore e $(z_u - z_r)$ è l’estensione dello pneumatico.

Si scrive l’equazione di misura $y = Cx$ supponendo di utilizzare un solo sensore LVDT (Linear Variable Differential Transformer) per misurare l’estensione dell’ammortizzatore, simulando una situazione realistica dove lo stato non è interamente accessibile, ma è richiesto un opportuno osservatore per stimare tutte le componenti dello stato a partire dalle misure e dagli ingressi di controllo.

Il profilo della strada z_r viene modellato come l’uscita di un filtro del primo ordine applicato ad un rumore bianco, Gaussiano. La varianza del rumore

bianco in ingresso dipende dall’irregolarità del profilo stradale considerato.

Una volta ricavate le equazioni di stato del processo, si passa al progetto del sistema di controllo. Avendo supposto lo stato non completamente accessibile, è necessario progettare un osservatore in grado di stimare tutti gli elementi del vettore di stato a partire dalle misure e dall’ingresso di controllo. In particolare si utilizza un osservatore alla Luenberger il cui guadagno K deve essere opportunamente calcolato in modo da garantire che l’errore di stima dello stato tenda a zero per $t \rightarrow \infty$. Nel caso in esame si è determinato il guadagno K imponendo il seguente polinomio caratteristico

$$\chi_{A-KC}(s) = (s^2 + 40\omega_l s + \omega_l^2)(s + 100),$$

$$\omega_l = 18.85 \text{ rad/s}$$

Per stabilizzare il sistema si utilizza un regolatore statico che calcola l’ingresso di controllo u retroazionando lo stato stimato con un vettore di guadagni F . Il regolatore viene progettato indipendentemente dall’osservatore sfruttando il principio di separazione. La composizione del regolatore statico e dell’osservatore prende il nome di regolatore dinamico.

Dalla teoria si ha che se l’osservatore è asintotico e il regolatore è tale per cui gli autovalori della matrice $A + BF$ sono asintoticamente stabili, allora il sistema ad anello chiuso complessivo è asintoticamente stabile.

Per il progetto del regolatore si utilizza la tecnica di controllo ottimo lineare quadratico che consente di determinare il guadagno del regolatore che minimizza un opportuno funzionale di costo, che nel sistema in esame è definito come segue:

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 + r J_4$$

con

$$J_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \dot{z}_s^2 dt$$

$$J_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (z_s - z_u)^2 dt$$

$$J_3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (z_u - z_r)^2 dt$$

$$J_4 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$$

I coefficienti w_1, w_2, w_3, r sono fattori di peso scelti dal progettista in base alle specifiche da soddisfare:

il fattore w_1 pesa l'accelerazione della massa sospesa, il fattore w_2 pesa l'estensione dell'ammortizzatore, il fattore w_3 pesa l'estensione dello pneumatico e il fattore r pesa l'ingresso di controllo. Quindi per privilegiare il comfort è necessario scegliere w_1 molto maggiore degli altri fattori di peso in modo da penalizzare maggiormente valori di accelerazione della massa sospesa elevati, mentre per privilegiare la guidabilità e la prontezza del sistema è opportuno scegliere w_2 e w_3 molto maggiori degli altri fattori. Infine si è inserito un peso r sull'ingresso di controllo al fine di realizzare una configurazione che minimizza la forza realizzata dal sistema sospensivo limitandone i consumi e l'usura. Tale configurazione ha minore interesse pratico, ma può risultare utile in situazioni per cui non sono richieste particolari prestazioni.

Con opportuni passaggi matematici si esprime il funzionale di costo in funzione dello stato del sistema e basandosi sulla teoria del controllo ottimo lineare quadratico si calcola il guadagno del regolatore F^* che minimizza tale costo al variare dei fattori di peso.

Si procede ora all'implementazione di tale legge di controllo sulle due tipologie di sospensioni regolabili considerate: attiva e semi-attiva.

Nel caso della sospensione attiva, disponendo di un attuatore in grado di realizzare la forza di controllo u desiderata, è possibile implementare direttamente la legge di controllo ottima ricavata precedentemente.

La sospensione semi-attiva Skyhook, invece, realizza una forza di controllo composta da due termini: un termine proporzionale alla velocità assoluta della massa sospesa tramite un coefficiente di smorzamento costante ed un termine proporzionale alla velocità relativa tra le due masse tramite un coefficiente di smorzamento regolabile.

$$u_{sky} = c_{sky}\dot{z}_s + c_v(\dot{z}_s - \dot{z}_u) = F_s Hx$$

Si ha una dipendenza della legge di controllo dalle sole prime due variabili del vettore di stato, perciò non è possibile implementare direttamente il guadagno ottimo del regolatore. Si cerca quindi una soluzione sub-ottima secondo il metodo dei minimi quadrati, cioè si cerca il guadagno F_s che minimizza la seguente norma:

$$\min_{F_s} \|F_s H - F^*\|^2$$

La soluzione ai minimi quadrati assume la forma riportata di seguito:

$$F_s = F^* H^T (H H^T)^{-1}$$

$$u_{sky} = F^* H^T (H H^T)^{-1} Hx$$

Le leggi di controllo così determinate sono utilizzate per realizzare le simulazioni attraverso il software Simulink. Nello schema Simulink, per simulare una situazione reale, si sono inseriti un rumore di misura additivo sull'uscita y e un blocco di saturazione sulla forza di controllo u , che nel caso di sospensione attiva rappresenta la saturazione dell'attuatore, mentre nel caso di sospensione semi-attiva rappresenta la saturazione del coefficiente di smorzamento variabile. In quest'ultimo caso il limite di saturazione è stato imposto facendo riferimento alla caratteristica ingresso-uscita di una sospensione semi-attiva realizzata con fluido magneto-reologico (MR).

Il profilo della strada utilizzato simula un asfalto molto sconnesso al fine di confrontare il comportamento delle diverse tipologie di sospensioni in condizioni particolarmente critiche. Sono state realizzate una serie di prove al variare dei fattori di peso scelti in modo da realizzare i seguenti assetti:

- *assetto comfort*, dove si minimizza l'accelerazione della massa sospesa (sospensione "morbida");
- *assetto sportivo*, dove si minimizzano le estensioni dell'ammortizzatore e dello pneumatico (sospensione "rigida");
- *cheap control*, dove si minimizza la forza richiesta all'attuatore.

Le simulazioni effettuate hanno messo in risalto la grande versatilità e riprogrammabilità di questi sistemi di sospensioni: variando opportunamente i fattori di peso, che agiscono su accelerazione della massa sospesa, estensione dell'ammortizzatore, estensione degli pneumatici e ingresso di controllo, si può variare in modo molto marcato il comportamento della sospensione.

Il confronto fra le diverse tipologie di sospensioni ha mostrato, in generale, il netto miglioramento prestazionale che si ottiene utilizzando sospensioni regolabili rispetto alle sospensioni passive. Le simulazioni hanno evidenziato come le prestazioni della sospensione semi-attiva Skyhook siano molto simili alle prestazioni della sospensione attiva (che realizza la legge di controllo ottima) in qualunque assetto. I limiti principali della tecnologia Skyhook si vedono, come è facilmente intuibile, in applicazioni particolarmente esigenti: in particolare si è visto come im-

postando i fattori di peso per raggiungere un livello di comfort estremamente elevato le prestazioni della sospensione semi-attiva si discostano maggiormente dall'eccellente comportamento ottenuto con la sospensione attiva.

In seguito si realizza il progetto digitale discretizzando il processo con una frequenza di campionamento di 100 Hz. Si calcolano il regolatore ottimo e l'osservatore secondo la teoria nel caso tempo-discreto. Analizzando le simulazioni, realizzate in maniera analoga al caso tempo-continuo, si può apprezzare come il comportamento del sistema di controllo tempo-discreto sia molto vicino al comportamento del sistema analogico, per cui tutte le considerazioni fatte in precedenza valgono anche in questo caso. Il progetto digitale è stato studiato in quanto l'implementazione reale avviene su un sistema tempo-discreto.

Il grande vantaggio della sospensione Skyhook consiste nell'elevato rapporto qualità-prezzo rispetto alla sospensione attiva: la presenza dell'attuatore incrementa il costo e rende il sistema attivo adatto ad autovetture altamente performanti e all'ambiente agonistico dove l'aspetto economico diventa secondario rispetto alla ricerca delle prestazioni migliori. In tutte le altre applicazioni l'aumento prestazionale ottenuto con la sospensione attiva non giustifica l'incremento in termini di costi, perciò la sospensione

semi-attiva Skyhook è adatta per tutti i tipi di autovetture stradali di fascia media e medio-alta.

La tecnica di controllo ottimo, specie nella sua implementazione digitale, è particolarmente indicata per l'applicazione considerata grazie alla elevata riprogrammabilità: per cambiare l'assetto è sufficiente modificare i fattori di peso del funzionale di costo e ricalcolare il regolatore ottimo, ad esempio tramite un opportuno microcontrollore. In questo modo è possibile agire in tempo reale sugli attuatori e sui coefficienti di smorzamento variabili. Pensando ad una applicazione nelle autovetture stradali si potrebbe realizzare un selettore con cui l'utente varia in tempo reale i fattori di peso tra valori preimpostati dal progettista in modo da modificare l'assetto della vettura in base alle esigenze e alle condizioni dell'asfalto.

Si può quindi concludere che la sospensione semi-attiva Skyhook, pur rappresentando una soluzione sub-ottima al problema di controllo, rappresenta il miglior compromesso fra prestazioni e costi. I sistemi di sospensione regolabili, eventualmente accompagnati da altri sistemi di controllo, come la regolazione della mappatura del motore, consentono di rendere la vettura completamente adattabile alle condizioni ambientali e dell'asfalto aumentando, oltre al comfort e alla guidabilità, anche la sicurezza in caso di condizioni climatiche sfavorevoli e su terreni scivolosi.

INGEGNERE

Francesco Laponi

TITOLO TESI: *Tecniche di monitoraggio e controllo delle linee della rete di trasmissione nazionale*

RELATORE: **Prof. Giancarlo Martarelli**

Inquadramento del tema trattato e del lavoro svolto

L'elaborato di tesi si pone l'obiettivo di esporre le principali attività di manutenzione svolte dal gestore della rete di trasmissione nazionale Terna sulle linee elettriche AT, di analizzare lo stato dell'arte a livello europeo nell'ambito della manutenzione delle linee elettriche e di proporre nuove soluzioni per un diverso approccio di rilevamento delle caratteristiche dei componenti delle linee elettriche con modalità on-line o comunque al minimo impatto, al fine di diagnosticare in modo precoce le anomalie e/o stimare la vita residua dei componenti. In particolare, le informazioni utilizzate per la stesura della tesi sono state raccolte attraverso un periodo di tirocinio della durata di sei mesi svolto presso la sede Terna di Firenze, attraverso una convenzione stipulata tra l'Università degli Studi di Firenze e l'Azienda stessa.

Il processo di mantenimento che Terna svolge sulle proprie linee ha l'obiettivo primario di garantire la qualità del servizio nella trasmissione dell'energia elettrica al minimo costo. Tale obiettivo si persegue operando con la massima efficienza per migliorare la disponibilità della rete elettrica, l'affidabilità dei componenti e l'allungamento della vita utile degli impianti. La disponibilità e l'affidabilità si raggiungono attuando opportuni piani di monitoraggio, manutenzione e rinnovo mirati. I piani vengono elaborati sulla scorta delle indicazioni fornite da un sistema gestionale specialistico opportunamente progettato, denominato MBI (Monitoraggio e Business Intelligence).

Le attività di manutenzione comprendono gli interventi di monitoraggio (controllo dello stato degli impianti), manutenzione ordinaria e manutenzione straordinaria (rinnovo).

Si definisce controllo l'insieme delle attività volte alla conoscenza dello stato della linea, o di parte di essa e del territorio circostante che serve alla definizione, qualificazione e quantificazione degli interventi necessari al mantenimento della piena efficienza e sicurezza dell'elettrodotto e del suo adeguamento ad eventuali disposizioni di legge. Esistono diversi tipi di controlli a seconda delle modalità di esecuzione, dei programmi temporali di esecuzione e dell'indisponibilità delle linee: si tratta di controlli di sorveglianza, controlli occasionali e controlli tecnici.

In particolare il presente elaborato si è concentrato sullo studio delle linee elettriche aeree in quanto costituiscono circa il 98% della rete di trasmissione nazionale. Per questo motivo sono state affrontate e studiate nel dettaglio le tecniche di controllo e manutenzione relative ai principali elementi costituenti le linee elettriche aeree: conduttori, funi di guardia, isolatori di linea e sostegni di linea. A corredo dello studio riguardante le tecniche di manutenzione e controllo i componenti delle linee elettriche aeree, nella tesi vengono riportate una serie di esperienze sui controlli e interventi reali svolti sulle linee raccolti sul campo attraverso la diretta e personale collaborazione con il personale operativo Terna.

Il confronto e l'analisi fra le tecniche di manutenzione e di controllo, svolte in altri Paesi europei, con

Tecniche di monitoraggio e controllo delle linee della rete di trasmissione nazionale

La trasmissione dell'energia elettrica è il passaggio intermedio tra la produzione e la distribuzione dell'energia elettrica. In Italia la Rete di Trasmissione Nazionale, in acronimo RTN, è gestita dalla società Terna con oltre il 98,5% della rete totale. La rete in Alta Tensione, si compone di linee elettriche aeree, circa il 95% del totale, e linee elettriche in cavo circa il 5%. Poiché la stragrande maggioranza della RTN è realizzata da linee elettriche aeree, l'elaborato di tesi tratta i principali controlli e tecniche di manutenzione dei componenti delle linee elettriche aeree.

Obiettivo

L'elaborato di tesi ha studiato le principali tecniche di manutenzione e controllo svolte dal gestore Terna sulle linee della RTN ed ha analizzato nel dettaglio lo stato dell'arte europeo nell'ambito delle tecniche di manutenzione delle linee elettriche AT. Successivamente l'elaborato di tesi si è sviluppato nell'ottica della **diagnostica predittiva**, con due obiettivi di fondo:

- ✓ individuare precocemente le anomalie che affliggono i componenti critici per l'esercizio della rete;
- ✓ stimare la vita residua dei componenti maggiormente soggetti a guasti (*conduttori e funi di guardia*).

Soluzione

➤ Al fine di effettuare una analisi in maniera semplice, non invasiva e approfondita dello stato interno dei **conduttori** delle linee elettriche, è stato sperimentato uno strumento innovativo Accumax-3, prodotto dalla Taurus Powertronic visibile in Figura 1. La metodologia su cui si basa lo strumento è quella di iniettare all'interno dei conduttori dei segnali in alta frequenza ed, elaborando i segnali riflessi, è possibile effettuare l'analisi dello stato interno della linea.



Figura 1

➤ Per le **funi di guardia** viene proposta una metodologia di indagine che, attraverso il rilievo di alcuni parametri caratteristici dal campo, consente di valutare e quindi stimare la vita residua delle funi di guardia, Figura 2. Infatti, comparando i parametri rilevati sul campo con quelli empirici ottenuti dallo studio dei materiali e da prove di laboratorio, è possibile definire la tenuta meccanica della fune e quindi stimarne la vita residua.

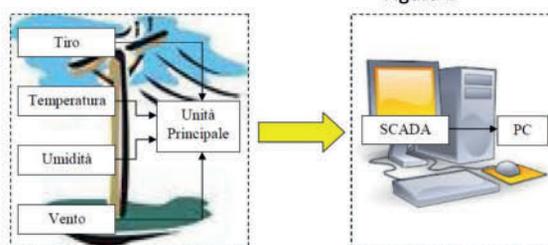


Figura 2

Risultati

La sperimentazione dello strumento Accumax-3 è stata valutata positivamente in quanto tale strumento analizza lo stato interno dei conduttori della linea fornendo delle indicazioni, attraverso appositi report grafici visibili in Figura 3, su disomogeneità presenti in punti specifici della linea. Tali punti rappresentano lo stato iniziale di future anomalie che con i controlli attualmente in uso non è possibile rilevare.

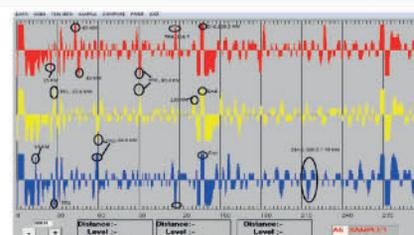


Figura 3

Tale strumento consente quindi di monitorare costantemente lo stato di conservazione dei conduttori delle linee elettriche definendo una stima sulla vita residua, in modo tale da intervenire preventivamente ottimizzando quindi i controlli e riducendo le risorse necessarie al mantenimento delle linee elettriche.

quelle attualmente svolte da Terna, permettono di ottenere informazioni utili per migliorare e ottimizzare i controlli e fornire nuovi approcci per la manutenzione delle linee elettriche aeree. A tale scopo è stata realizzata un'indagine articolata tramite un questionario con diverse sezioni ognuna delle quali dedicata alle metodologie e tecniche di manutenzione di ogni singolo componente facente parte delle linee elettriche aeree, inoltrata ai maggiori gestori europei di linee di trasmissione.

Una discreta affluenza al sondaggio ha reso possibile comprendere e confrontare le attività di manutenzione e controllo svolte dagli altri gestori con le attività normalmente svolte da Terna. Dal confronto svolto elaborando le risposte dei gestori europei è emerso come Terna in linea generica attui una politica di manutenzione e controllo delle linee del tutto simile a quella degli altri gestori. Da osservare, però, come in particolari ambiti l'operato svolto da Terna sia all'avanguardia rispetto a quelli attualmente svolti da altri gestori europei. Da notare come dall'analisi del questionario non siano emersi nuove metodologie di indagine né nuovi strumenti innovati utili all'individuazione dei guasti maggiormente frequenti sulle linee elettriche aeree.

Poiché dall'indagine non sono emerse novità significative riguardanti le tecniche e le metodologie di indagine sulle linee elettriche aeree, sono stati proposti nuove metodologie di indagine e nuovi approcci per la determinazione di quelle anomalie che attualmente affliggono con maggiore frequenza i componenti più critici per l'esercizio della rete, quali *conduttori* e *funi di guardia*.

Conduttori

I conduttori sono un elemento evidentemente critico per l'esercizio della rete, in quanto con i controlli attualmente svolti è possibile evidenziare solamente stati di degrado importanti tramite l'osservazione dello stato esterno dei conduttori stessi. Infatti, nel periodo di osservazione intercorrente dal 1° gennaio al 26 settembre 2012, sono avvenute trentacinque rotture di conduttori su tutto il territorio nazionale. Per questi motivi, risulta essere di notevole interesse un nuovo strumento di analisi basato sull'indagine in frequenza, poiché permette di analizzare in maniera non invasiva, approfondita e semplice lo stato interno delle linee elettriche aeree ed in particolare dei con-

duttori, senza interessare l'esercizio della rete stessa. Tale metodologia consiste nell'iniettare all'interno dei conduttori dei segnali in alta frequenza, ed elaborando i segnali riflessi è possibile effettuare l'analisi della linea. Questa metodologia è utilizzata dallo strumento Accumax-3, prodotto dalla Taurus Powertronic, oggetto di una campagna sperimentale su linee Terna riportata ed analizzata nel presente elaborato di tesi.

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di verificare le reali possibilità di applicazione dello strumento di indagine Accumax-3 per l'analisi dei conduttori delle linee elettriche aeree Terna all'interno del territorio nazionale.

Tale sperimentazione non è stata quindi rivolta all'identificazione di macrofenomeni, come aperture dei colli morti o rottura di un conduttore rilevabile dalle protezioni logiche direzionali già in dotazione a Terna, ma è stata rivolta all'individuazione di quei microfenomeni, ad oggi rilevabili solamente in uno stato avanzato, che amplificandosi nel corso del tempo potrebbero comportare un fuori servizio della linea, come punti caldi, strefolature e distanziatori danneggiati.

La sperimentazione dello strumento è avvenuta attraverso alcune prove su diverse tipologie di linee elettriche aeree presenti all'interno del territorio nazionale. In particolare attraverso l'elaborazione dei dati raccolti nelle fasi operative, è stato possibile individuare delle disomogeneità in punti specifici della linea che debbono essere tenute sotto controllo poiché rappresentano delle anomalie in una fase iniziale e che con i controlli attuali non è possibile evidenziare.

Funi di guardia

Le funi di guardia, come peraltro i conduttori, sono un elemento assai critico per l'esercizio delle linee elettriche aeree in quanto la loro rottura provoca, di norma, lo scatto della linea elettrica sottostante. I motivi di rottura sono essenzialmente da rilevare nella perdita nel tempo delle caratteristiche meccaniche dovute a presenza di ossidazione e fenomeni quali fulmini, urti, presenza di sfere e vibrazioni, che possono innescare fenomeni di fatica. I casi di fulminazione diretta o contatto della fune con un conduttore a seguito di avvicinamento per neve, rientrano in una casistica non prevedibile e pertanto rientrano nei guasti accidentali. Per questi motivi, ai fini della resistenza

nel tempo delle funi di guardia, i fenomeni di degrado sono dovuti essenzialmente a fatica e a corrosione.

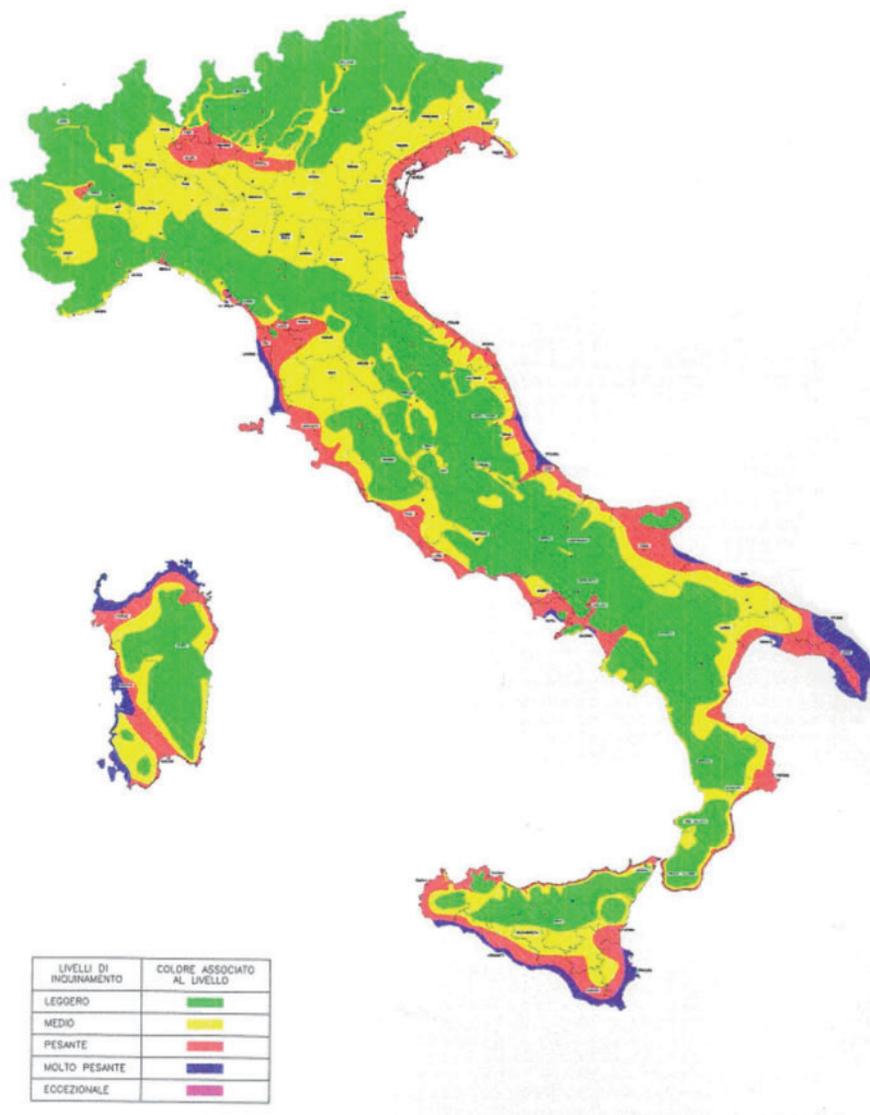
Con i controlli attualmente svolti, risulta difficile valutare lo stato di conservazione delle funi di guardia e definirne la vita residua. Infatti, la soluzione attualmente in uso è quella di cambiare le funi di guardia con una certa periodicità, indipendentemente dal loro stato di conservazione, con particolare attenzione per gli attraversamenti stradali.

Per questi motivi viene proposta una metodologia di indagine che, attraverso il rilievo di alcuni parametri caratteristici dal campo (temperatura, umidità, vento e tiro meccanico), consente di valutare e quindi stimare la vita residua delle funi di guardia.

In particolare, l'attenzione è rivolta ad analizzare la risposta della fune in termini di tenuta meccanica,

valutando gli effetti combinati di fatica e corrosione. Infatti, è possibile affermare come il fenomeno della fatica e quello della corrosione si catalizzino reciprocamente e quindi ne consegue un effetto sinergico nel danneggiamento del materiale che preclude la sua tenuta meccanica. L'innovazione proposta in questo elaborato di tesi riguarda una nuova metodologia di indagine per lo studio dello stato di conservazione della fune di guardia. Infatti, comparando i parametri rilevati direttamente sul campo con quelli empirici ottenuti dai materiali e dalle prove di laboratorio, è possibile stimare la vita residua della fune. La metodologia proposta si articola nei seguenti passi successivi:

- 1) Caratterizzazione del materiale della fune di guardia, in termini di resistenza alla fatica e alla corrosione;



▲ Fig. 1 - Mappatura del territorio nazionale

- 2) Individuazione dei parametri che influenzano la vita utile della fune di guardia;
- 3) Definizione delle campate critiche;
- 4) Sistema di rilievo dei parametri della linea;
- 5) Elaborazione dei dati raccolti dal campo e stima della “vita residua” della fune di guardia.

Grado di innovazione dei risultati ottenuti

I principali risultati prodotti dall'elaborato di tesi sono stati i seguenti:

- Fornire una consistenza relativa all'attuale stato dell'arte europeo in merito alle metodologie dei controlli e della manutenzione sulle linee elettriche aeree effettuati dagli altri gestori europei, ad oggi sconosciuta a Terna.
- Le metodologie di controllo proposte per i conduttori e le funi di guardia in questa tesi, hanno mostrato la possibilità di introdurre, anche per le linee elettriche aeree, modalità rivolte ad individuare in fase iniziale la formazione e l'evoluzione di eventuali anomalie e/o difetti sui conduttori e a stimare la vita residua delle funi di guardia.

In particolare, la sperimentazione dello strumento Accumax-3, seguita nel dettaglio nel presente elaborato, ha fornito indicazioni su possibili anomalie e disomogeneità presenti nelle linee. La conoscenza della linea, con successive analisi temporali, consentirà sempre più di ottenere migliori informazioni effettuando analisi in concomitanza dei fuori servizi programmati. Inoltre la conoscenza di potenziali anomalie e difetti consentirà una migliore programmazione degli interventi di manutenzione. Infine non è da trascurare l'aspetto economico dell'impiego di tale strumento che, nonostante un discreto costo iniziale, consentirà di evitare l'ispezione dei conduttori della linea da parte del personale tecnico Terna, riducendo i relativi costi per l'azienda.

Per quanto riguarda le funi di guardia, una conseguente correlazione diretta per la stima della vita residua della fune esiste tra l'ossidazione e i fenomeni di fatica. Con la metodologia proposta il rilievo e l'analisi dei parametri caratteristici, attraverso la teoria di Miner e le prassi descritte dallo standard ISO 9224, sarà possibile stimarne la vita residua. La possibilità di stimare la vita residua della fune di guardia permette quindi di effettuarne la sostituzione prima del verificarsi di anomalie e/o guasti, con un risparmio economico rilevante, in quanto ad oggi la sostituzione della

fune viene fatta periodicamente indipendentemente dallo stato di conservazione.

Possibile impatto applicativo dei risultati ottenuti

La sperimentazione dello strumento Accumax-3 e la metodologia proposta per il monitoraggio dello stato di conservazione delle funi di guardia risultano essere in linea con il nuovo approccio della “manutenzione sostenibile” rivolto essenzialmente ad elaborare informazioni direttamente ricevute dal campo eseguendo previsioni statistiche attendibili al fine di stimare la vita residua dei singoli componenti.

Rispetto allo stato attuale dei controlli svolti da Terna e dagli altri gestori europei, questa tipologia di analisi permetterebbe di effettuare una metodologia di indagine predittiva, e non su guasto, come è attualmente, e quindi consentirebbe di indirizzare le risorse in quelle aree in cui potrebbe manifestarsi una qualunque anomalia, in modo tale da aumentare l'efficacia dei controlli riuscendo ad ottimizzare e migliorare l'utilizzo delle risorse attualmente disponibili.

In particolare i risultati della sperimentazione sono stati analizzati nel dettaglio anche dal personale tecnico di Terna che ha espresso un giudizio favorevole sulle potenzialità e sulla capacità di analisi in maniera del tutto semplice e non invasiva dei conduttori delle linee elettriche aeree. Per questo, motivo terminata la fase sperimentale, dopo un breve periodo di riflessione Terna ha deciso di acquistare tale strumento che, di fatto, si è reso disponibile nella sede di Firenze a partire dal giugno 2013. Da questa data è entrato pienamente in esercizio con una ulteriore fase sperimentale di approfondimento, e si presuppone che dall'inizio del 2014 possa essere utilizzato a regime dal personale tecnico Terna per un nuovo approccio nella manutenzione delle linee elettriche aeree.

Rilevanza scientifica dei risultati ottenuti ed eventuali pubblicazioni

La sperimentazione dello strumento di analisi linee Accumax-3 descritta nella presente tesi è stata ripresa in buona parte ed utilizzata dal personale tecnico di Terna per realizzare una relazione tecnica aziendale in merito ai risultati ottenuti dalle prove sperimentali, intitolata: *Relazione sullo strumento di analisi linee Accumax-3: Analisi dei risultati delle tre giornate di prova su elettrodotti a 132 kV, 220 kV e 380 kV.*

INGEGNERE

Chiara Risaliti

TITOLO TESI: *Analisi di affidabilità di schede elettroniche e human factor nell'utilizzo di dispositivi medici*

RELATORE: Prof. Marcantonio Catelani

1° OBIETTIVO:

Analisi di affidabilità nel tempo di tre schede elettroniche

Modello funzionale serie

Ipotesi di lavoro

1. Guasti casuali: questo significa che siamo nella regione della curva a vasca di "vita utile" dei componenti, dove il tasso di guasto (λ) può essere considerato costante nel tempo, ovvero vale la relazione:

$$\prod_i R_i(t) = \prod_i e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda_{sist} t}$$

con $R(t)$: affidabilità in funzione del tempo.

2. Guasti indipendenti: la probabilità di accadimento di ogni guasto è indipendente l'una dall'altra, ovvero:

$$P(E_1) * P(E_2) * \dots * P(E_n) = \prod_i P(E_i)$$

3. Configurazione serie (worst case): cioè il sistema funziona, se e solo se, tutti gli elementi sono funzionanti.

Viste le prime tre ipotesi vale la seguente relazione:

$$\lambda_{sist} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \rightarrow MTBF = \frac{1}{\lambda_{sist}}$$

4. Fattori ambientali: a partire dalla classificazione della MIL-HDBK 217-F è stato scelto come ambiente un GB (Ground Benign – ambiente fisso protetto) per tutte e tre le schede in questione, in quanto le condizioni ambientali nelle quali le "Board" sono destinate a lavorare rientrano nei parametri minimi specificati dallo standard in oggetto anche in termini di vibrazioni

5. Condizioni di temperatura: è stato considerato un range di temperatura da 0°C a 100°C, ma nel dettaglio sono stati considerati i risultati di failure rate e MTBF relativi alle temperature: 30°C, 35°C, 40°C e 45°C.

6. Carico di lavoro: è stato considerato che il sistema sia in funzione ventiquattro ore al giorno, trecentosessantacinque giorni all'anno.

7. Quality factor: per alcuni componenti elettronici i datasheet specificavano il soddisfacimento dei requisiti minimi di qualità secondo i parametri della MIL-HDBK 217, per gli altri è stata fatta l'ipotesi cautelativa di qualità COMMERCIAL (bassa qualità).

Risultati:

La tabella 1 mostra i risultati della previsione e si può vedere come all'aumentare della temperatura l'MTBF (tempo medio tra guasti) diminuisca per tutte e tre le schede. Possiamo inoltre notare la netta differenza dei risultati tra la scheda BIB e la scheda SCB, dovuta sia alla differenza di complessità dell'ultima rispetto alla prima, che è semplicemente una scheda di interfaccia, sia al numero di componenti (il valore del tempo medio tra guasti, infatti, diminuisce all'aumentare del numero di componenti della scheda).

Le figure 1, 2, 3 rappresentano l'andamento dell'affidabilità delle tre schede in funzione del tempo, ai

1 Le tre schede elettroniche saranno chiamate d'ora in avanti con gli acronimi BIB, PIB e SCB.

quattro valori di temperatura, possiamo notare che all'aumentare della temperatura alla quale la scheda lavora l'affidabilità nel tempo diminuisce.

Fault Tree Analysis (FTA)

Per le stesse tre schede è stata effettuata una analisi di affidabilità tramite un'analisi FTA.

L'FTA è un metodo di analisi previsionale utilizzato per stimare la probabilità di accadimento di un certo evento indesiderato basandosi sull'individuazione delle cause di guasto di un sistema, in questo caso è stata applicata per valutare l'andamento dell'affidabilità nel tempo delle stesse tre schede elettroniche, ed il Top Event è il "malfunzionamento della scheda", da cui partono le ramificazioni considerando tutti gli eventi che possono portare al cattivo funzionamento della scheda, fino alla rottura fisica dei singoli componenti elettronici presenti nelle schede. Mentre per la previsione del tasso di guasto e del calcolo dell'MTBF, visti precedentemente, viene considerato un modello serie (worst case). Il vantaggio dell'analisi FTA è quello di considerare un modello basato su collegamenti tramite porte logiche che rispecchiano l'effettivo funzionamento delle schede. Ipotesi:

1. Guasti casuali: questo significa che siamo nella regione della curva a vasca di "vita utile" dei componenti, dove il tasso di guasto (λ) può essere considerato costante nel tempo. Per ogni componente è stato considerato il tasso di guasto ricavato dalla previsione di affidabilità alla temperatura di 40°C (perché da test termici effettuati tramite dei sensori posizionati in prossimità delle schede, la temperatura a cui effettivamente le schede lavorano è appunto 40°C).

2. Guasti indipendenti: la probabilità di accadimento di ogni guasto è indipendente l'una dall'altra.

Risultati

I grafici riportati rappresentano l'andamento dell'affidabilità stimata nella previsione (in rosso) e quella risultante dall'analisi FTA (in blu) entrambe in funzione del tempo.

Al tempo $t = 0$ chiaramente l'affidabilità è pari a 1 in entrambi i casi, ma all'aumentare dei valori di t l'andamento si discosta sempre più e la curva risultante dallo studio FTA rimane sempre al di sopra della curva della previsione basata sul modello serie.

Tabella 1

TEMPERATURE	VALUE	BIB	PIB	SCB
30°C	Failure Rate [Failure/10 ⁶ h]	0,48	2,02	13,69
	MTBF [h]	2'070'000	495'017	73'000
35°C	Failure Rate [Failure/10 ⁶ h]	0,54	2,32	15,10
	MTBF [h]	1'840'000	431'863	66'217
40°C	Failure Rate [Failure/10 ⁶ h]	0,61	2,70	16,74
	MTBF [h]	1'640'000	371'074	59'721
45°C	Failure Rate [Failure/10 ⁶ h]	0,68	3,18	18,67
	MTBF [h]	1'460'000	313'984	53'549

2° OBIETTIVO:

Valutazione dello Human Factor nell'utilizzo di dispositivi medici: proposta di procedura

Negli ultimi anni l'evoluzione tecnologica ha portato ad un aumento dell'affidabilità e della sicurezza dei sistemi, tuttavia non è possibile parlare di affidabilità di un sistema senza considerare lo "human factor" e quindi il ruolo dell'uomo nella dinamica degli eventi incidentali.

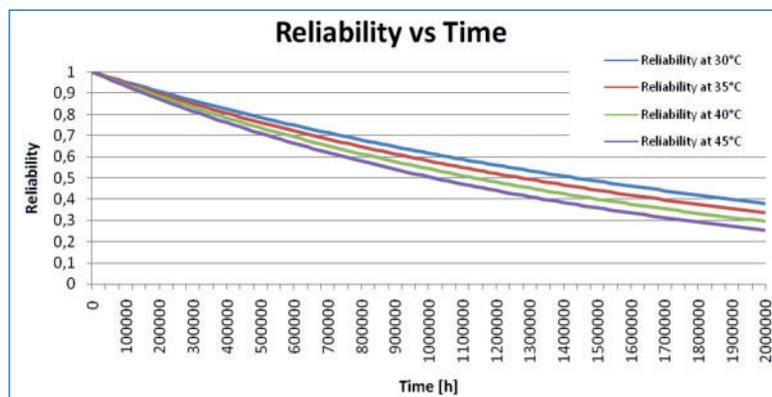
I fattori che possono influenzare l'operato umano possono essere classificati in due grandi categorie:

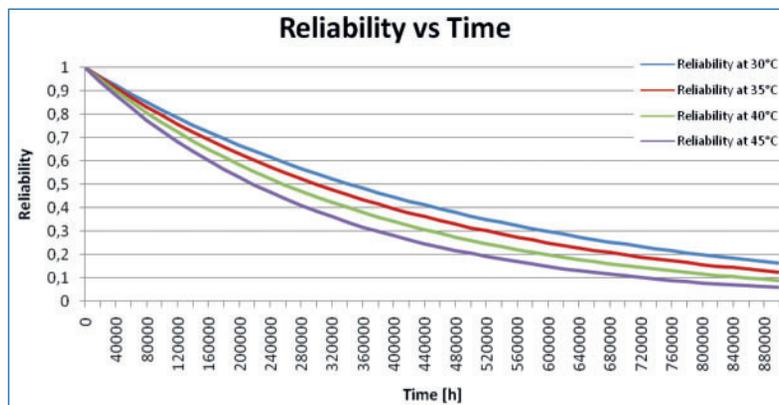
- fattori "esterni": tutti gli eventi che influenzano e alterano le condizioni di lavoro;
- fattori "interni": legati a caratteristiche individuali.

Da notare che con "operatore" si intende chi svolge l'azione, quindi sono compresi i tecnici che fanno per esempio il collaudo, il personale sanitario, ma anche il paziente stesso perché il DISPOSITIVO MEDICO potrebbe anche essere utilizzato a casa.

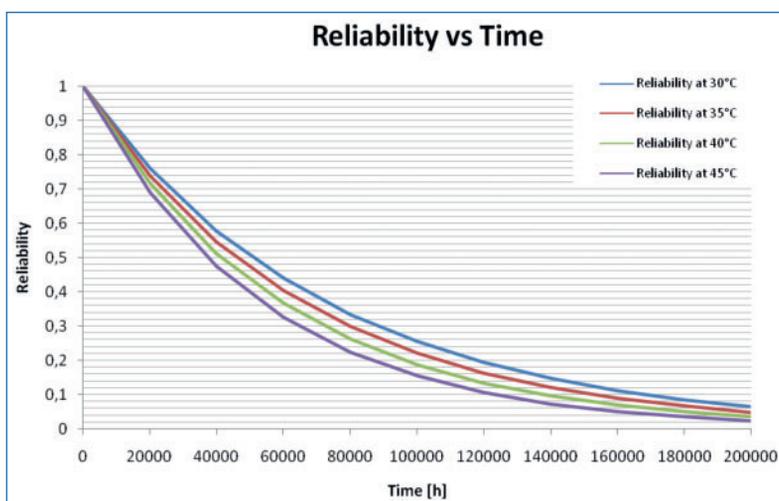
Per quanto riguarda soprattutto il campo del nucleare, in letteratura si trovano molti studi che affrontano il tema della Human Reliability Analysis (HRA). Tuttavia si trovano studi anche per il settore avionico, navale e dell'healthcare.

▼ Fig. 1 - Affidabilità nel tempo della scheda BIB





▲ Fig. 2 – Affidabilità nel tempo della scheda PIB



▲ Fig. 3 – Affidabilità nel tempo della scheda SCB

In quest'ultimo risultano essere state applicate sia metodologie a carattere generale, come la FTA, la FMECA e l'RCA, ma anche tecniche specifiche, realizzate proprio per la valutazione dello Human Error (THERP, TESEO, HCR, CREAM). Tuttavia tali metodologie, nell'ambito healthcare, sono utilizzate per valutare soprattutto il rischio clinico e mai per l'utilizzo specifico di un dispositivo medico.

Proposta di procedura

Per questo motivo, e per colmare le lacune che caratterizzano le varie metodologie esistenti, è stato deciso di proporre una procedura ex novo che permetta di valutare il rischio inerente all'operato umano nell'utilizzo di dispositivi medici. Chiaramente la procedura è stata sviluppata facendo riferimento e prendendo spunto dalle metodologie viste.

Ciclo vita

Come prima cosa l'operatore deve individuare il ciclo vita del dispositivo medico che vuole sottoporre a tale analisi.

Per poter garantire una uniformità di giudizio per chi applica la metodologia, è stato creato un apposito "format", che consiste in una lista di fasi che costituiscono il ciclo vita di un generico dispositivo medico. La lista proposta comprende tre macro-attività (preparazione, utilizzo e manutenzione del dispositivo) che sono a loro volta costituite da altre azioni più dettagliate.

- 1 Attività di preparazione del dispositivo:
 - 1.1 Attività di accettazione, collaudo, installazione;
 - 1.2 Attività di taratura, calibrazione, scelta delle impostazioni, dosi, parametri;
 - 1.3 Attività di sterilizzazione, disinfezione;
 - 1.4 Gestione dell'interazione tra dispositivi in caso di sistema.
- 2 Attività di utilizzo del dispositivo:
 - 2.1 Interpretazione del manuale d'uso, etichette, istruzioni, bugiardini, simboli;
 - 2.2 Utilizzo di tastiere, pulsanti, touch screen, joystick, manopole, impugnature e accessori vari;
 - 2.3 Utilizzo pratico del dispositivo medico per svolgere la funzione richiesta;
 - 2.4 Utilizzo di prodotti usa e getta o aventi una vita limitata (scadenza);
 - 2.5 Interpretazione interfaccia software;
 - 2.6 Interpretazione allarmi, warning visivi, sonori e/o luminosi;
 - 2.7 Interpretazione dei risultati con l'aiuto, o meno, di un software.
- 3 Attività di manutenzione del dispositivo:
 - 3.1 Attività di manutenzione preventiva primaria e secondaria del dispositivo, controlli e verifiche;
 - 3.2 Attività di manutenzione correttiva del dispositivo, controlli e verifiche di vario tipo;
 - 3.3 Conservazione del dispositivo quando non in uso;
 - 3.4 Dismissione, smaltimento del dispositivo e/o dei suoi prodotti.

È importante notare che con "ciclo vita" si intende, in questo caso, l'intervallo di tempo che va da quando il dispositivo viene fisicamente inserito nel luogo di utilizzo, fino al suo smaltimento. Si dà quindi per scontato che tale strumento sia stato progettato, pro-

Fig. 4 – Risultati FTA e Previsione a confronto per la scheda BIB ▶

dotto e trasportato fino al luogo di utilizzo, seguendo i principi dello stato dell'arte.

I sei parametri

Il passo successivo è stato quello di identificare quali potrebbero essere le cause di un eventuale errore da parte dell'operatore nello svolgere le azioni del ciclo vita. Sono stati quindi individuati 6 parametri:

1. Tipologia di attività ed impegno cognitivo: in funzione dell'impegno cognitivo che l'azione richiede per essere svolta correttamente avrà un diverso livello di rischio. E secondo il modello di comportamento di Rasmussen, l'impegno cognitivo dipende dal grado di routine dell'azione da svolgere.

2. Stress (tempo limitato, responsabilità e carico di lavoro) a cui l'operatore può essere soggetto.

3. Condizioni di rischio per l'operatore: le condizioni di rischio a cui l'operatore può essere esposto nello svolgere una determinata attività.

4. Condizioni ambientali: le condizioni di microclima, luminosità, rumori e vibrazioni che caratterizzano l'ambiente di lavoro (in funzione dell'utilizzo corretto del dispositivo medico).

5. Informazione, formazione, addestramento ed esperienza: il livello di informazione, formazione, addestramento dell'operatore nei confronti del dispositivo medico e l'esperienza maturata nel settore.

6. Gestione procedurale e organizzativa: a livello delle tecnologie e delle risorse necessarie.

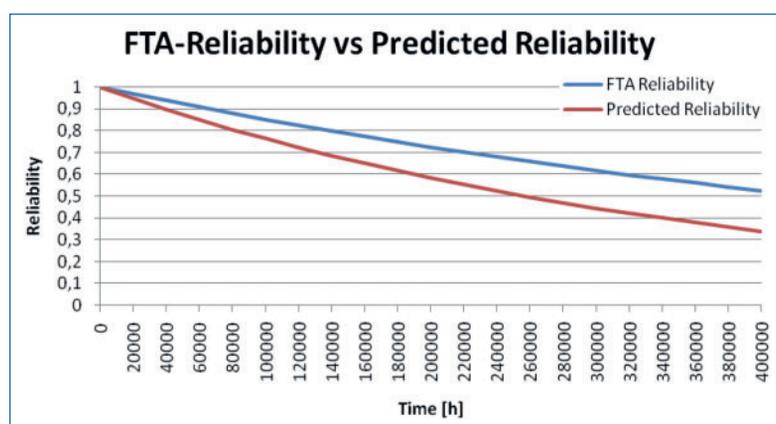
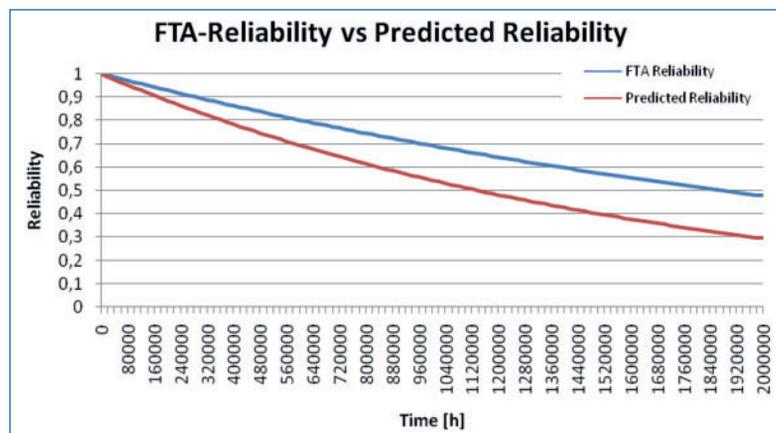
I Fattori O, I, P

La valutazione di questi parametri, viene effettuata tramite l'assegnazione, per ognuna delle attività del ciclo vita pertinenti, e per ognuno dei 6 parametri, di tre fattori. L'assegnazione dei fattori avviene tramite delle tabelle. I risultati vengono poi inseriti in un tool informatico appositamente creato.

O: fattore di accadimento

Fattore che permette di associare per ogni attività del ciclo vita la possibilità di accadimento di un errore in funzione di ognuno dei 6 parametri.

Sono state redatte 6 tabelle, una per ogni parametro. Al fattore viene assegnato un valore da 1 a 10, all'aumentare della possibilità di accadimento di tale errore.



▲ Fig. 5 – Risultati FTA e Previsione a confronto per la scheda PIB

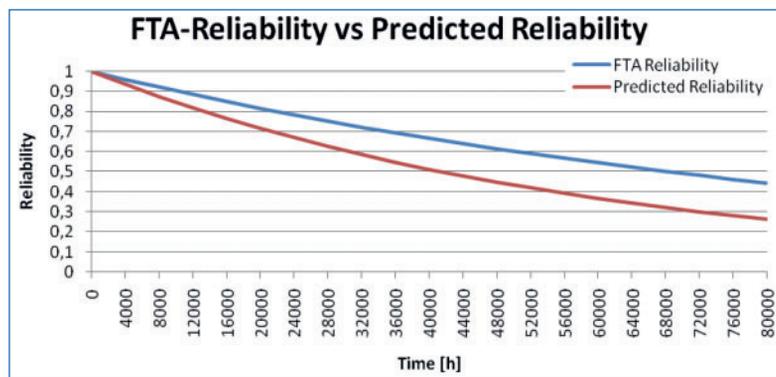
I: fattore di impatto

Anche in questo caso si associa ad ogni attività in questione un valore da 1 a 10 ed il valore aumenta in dipendenza dal fatto che l'errore potrebbe avere conseguenze sulla sicurezza nei confronti dell'ambiente circostante e del dispositivo medico stesso oppure anche sulle persone (paziente e operatore). In questo caso è stata redatta un'unica tabella che si adatta a tutti e 6 i parametri.

P: fattore di prevenzione

Serve per valutare quanto un possibile errore può essere prevedibile e quanto è stato fatto per far in modo che non si verifichi, tramite azioni preventive e misure di sicurezza idonee al caso. Anche in questo caso si associa un valore da 1 a 10 per ogni attività in funzione dei 6 parametri ed è stata redatta un'apposita tabella.

Da notare che, qualora il ciclo vita del dispositivo medico sottoposto a valutazione non preveda una o



▲ Fig. 6 – Risultati FTA e Previsione a confronto per la scheda SCB

più delle fasi descritte nel format, a tutti i tre fattori, per tutti i 6 parametri, deve essere assegnato il valore zero.

Risultati della procedura: indici di rischio

Le informazioni finali che la procedura restituisce sono:

- Indici di rischio K, relativi ognuno ad un parametro, aventi un valore compreso tra 0 e 1;
- Un indice di rischio globale ottenuto come il valor medio dei 6 indici parziali k, detto “Overall Human Error index”;
- Gli indici di rischio detti “Task Risk index” che valutano il rischio associato ad ogni attività, permettendo di capire quale tra le varie fasi del ciclo vita è quella più critica, in termini di human error.

Tale procedura può essere utilizzata a completamento delle tradizionali procedure per la Risk Analysis che seguono l’evoluzione del dispositivo medico durante tutto il suo ciclo di vita, dalla prima fase di progettazione fino a quella post-vendita.

Il processo di valutazione deve essere effettuato da un team multidisciplinare che conosca bene le caratteristiche del dispositivo medico.

Grado di innovazione ed impatto dell’applicazione

Questo lavoro è nato dall’esperienza maturata durante un tirocinio formativo presso una multinazionale che progetta e produce dispositivi medici.

Partendo dal presupposto che in letteratura non sono presenti ad oggi studi per la valutazione dello human error nell’utilizzo specifico dei dispositivi medici, la procedura proposta dà un risultato in termini di “indici di rischio”, quindi potremo definirla “semiquantitativa”. La metodologia può servire per confrontare in maniera oggettiva e scientifica il livello di rischio associato all’errore umano per due o più dispositivi medici. Anche se ad oggi non è possibile collocare i risultati ottenuti dall’applicazione di tale procedura in delle “categorie di rischio”, in quanto non è stata testata su un numero statisticamente significativo di dispositivi medici per poter delineare questi intervalli di rischio.

L’obiettivo futuro è quindi la validazione di tale metodologia per la realizzazione di queste categorie di rischio associato allo human factor dove andare a collocare i vari dispositivi, nell’ottica della mitigazione del rischio.

La procedura è stata applicata, durante il tirocinio, a due dispositivi medici progettati e prodotti dall’azienda in questione, dando risultati molto utili in termini di valutazione del rischio associato all’operatore e fornendo informazioni ulteriori sull’ergonomia e l’usabilità dei dispositivi.



*L'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Firenze
bandisce un concorso
per il conferimento di n. 6 premi di laurea.
I 6 premi saranno distinti per le lauree triennali
e per le lauree specialistiche/magistrali
e per i tre settori dell'Ingegneria:
Civile e Ambientale, Edile, Industriale, dell'Informazione.
Il tema del concorso è libero.*

(dal Bando del Premio di laurea in ingegneria "Piero Ciullini")

