

ISSN 2282-6599

RIVISTA DI ECONOMIA E POLITICA DEI TRASPORTI

Anno 2021
Numero 2

R.E.PO.T



SIET

Rivista Scientifica della Società
Italiana di Economia dei Trasporti e della
Logistica

L'ANALISI STATICA DELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO: COSA INSEGNA, PERCHÉ È UTILE, COME PUÒ ESSERE EFFICACE.

Marta Santagata^{1*}

¹ Dipartimento di Economia, Università di Genova

In questo lavoro vengono messe in luce le potenzialità delle analisi strutturali delle reti di trasporto. In particolare, dopo una rassegna dei principali indicatori utili a questo fine, come ad esempio le misure di centralità e gli indici di vulnerabilità e robustezza, viene proposta un'applicazione empirica. Seguendo un approccio basato sulla Complex Network Theory, viene analizzata la rete autostradale del Nord-Ovest italiano e viene utilizzato come caso studio il crollo del ponte Morandi avvenuto a Genova nel 2018. Infine, il lavoro evidenzia quali sono i punti fondamentali affinché le analisi statiche possano essere realmente utili per i policy maker e i gestori delle infrastrutture, primo fra tutti lo studio congiunto delle reti, considerando le interdipendenze sia geografiche sia funzionali che possono esistere tra due o più sistemi di trasporto.

Parole Chiave: Analisi strutturale, Reti di Trasporto, Indicatori di Centralità, Vulnerabilità, Robustezza.

* Corresponding author: marta.santagata@edu.unige.it

1 Introduzione

L'attività economica è fortemente legata al funzionamento delle reti infrastrutturali che oggi sono sempre più complesse e anche interdipendenti tra loro, si pensi ai sistemi di trasporto, alle reti elettriche, alle reti idriche ma anche ai sistemi di comunicazione (Ferrari et al., 2018). Concetti quali vulnerabilità e resilienza sono centrali nei dibattiti attuali, in un contesto in cui si assiste sempre più frequentemente ad eventi catastrofici (Nagurney, 2012), sia legati a disastri naturali sia legati all'azione dell'uomo. Facendo riferimento alle reti di trasporto, nella recente storia Europea si ricordano certamente il crollo del tunnel di Rastatt in Germania nel 2017 e il crollo del ponte Morandi nel 2018. Le infrastrutture di trasporto sono essenziali per la società in quanto permettono la mobilità di persone e merci (Rodrigue, 2020) e contribuiscono a diversi outcome economici, come la produzione, il commercio, o ancora l'innovazione (si vedano a questo proposito le survey di Afraz et al., 2006 e Ferrari et al., 2018). Le infrastrutture di trasporto sono anche fondamentali durante le situazioni di emergenza poiché permettono di soccorrere le persone ed anche riparare altre infrastrutture danneggiate (Mattsson and Jenelius, 2015). Proprio con riferimento alle situazioni emergenziali, la conoscenza della rete stessa è una parte fondamentale della gestione dell'emergenza in quanto può essere di grande supporto nel processo decisionale. In questo contesto, anche se è necessario riconoscere il ruolo fondamentale dello studio dinamico delle reti, anche l'analisi strutturale riveste un ruolo importante soprattutto per ciò che concerne la sfera della robustezza dell'infrastruttura di trasporto, che è un prerequisito fondamentale per un efficiente recupero dopo un'emergenza (Dong et al. 2020).

In questo articolo si adotta un approccio basato sulla Complex Network Theory per esplorare quali sono gli indicatori di centralità utili per studiare le caratteristiche strutturali di una rete di trasporto e per identificarne le componenti critiche. In particolare, si propone un'applicazione con riferimento alla rete autostradale del Nord-Ovest italiano e legata al crollo del ponte Morandi, fornendo quindi esempi di come i diversi indicatori cambiano quando viene rimosso un segmento o un nodo della rete. Oltre agli indicatori più classici come Degree Centrality, Betweenness Centrality, Closeness Centrality, viene posta attenzione a concetti chiave quali la vulnerabilità e la robustezza. Infine, vengono tratte alcune considerazioni finali sull'importanza delle analisi strutturali come strumenti per i policy maker e viene introdotto il concetto di interdipendenza delle reti di trasporto da cui deriva una grande sfida per la gestione efficace dell'infrastruttura.

Da questo studio emerge che gli indicatori statici possono rappresentare un importante strumento per comprendere le componenti critiche di un sistema di trasporto soprattutto se utilizzati nel contesto di simulazioni nelle quali vengono rimossi nodi o archi del network.

Nella Sezione 2 si propone un'analisi dei principali indicatori sia a livello di singoli nodi sia a livello della rete nel suo complesso. Nella Sezione 3 si mostrano i risultati ottenuti nell'applicazione empirica e nella Sezione 4 vengono proposte alcune considerazioni generali ed anche alcune riflessioni sul tema dell'interdipendenza delle reti. Infine, nella Sezione 6 sono tratte le principali conclusioni dello studio.

2 Le caratteristiche strutturali della rete

Seguendo l'approccio della Complex Network Theory, la rete può essere astratta dalla realtà per semplificarla e studiarla come un insieme di nodi (o vertici) e di archi che li connettono tra di loro. Ogni nodo rappresenta un punto terminale della rete, come ad esempio un casello autostradale, o un'intersezione, e ogni link rappresenta un segmento di infrastruttura, es. un tronco autostradale, che permette il movimento tra due nodi. Gli archi possono essere pesati o non pesati, e nel contesto delle autostrade il peso più frequentemente usato è la distanza chilometrica tra due nodi. In alcuni casi può anche essere utile pesare gli archi in base alla loro capacità, in base ai livelli di saturazione ed anche al livello di flussi medi.

I grafi delle reti possono essere studiati sia a livello “micro”, cioè a livello del singolo nodo, sia a livello “macro”, cioè a livello dell'intero sistema. Per quanto concerne l'analisi a livello di nodo, particolare importanza assumono le misure di centralità della rete. Quando si parla di centralità ci si riferisce in senso più lato all'importanza di ciascun nodo, e proprio in base al significato attribuito al termine “importanza” si possono definire diverse misure di centralità. Alcune tra le principali sono descritte in Tabella 1.

Tabella 1. Misure di Centralità della rete di trasporto.

Misura Centralità	di	Definizione	Descrizione	Note
Degree Centrality		Numero di link adiacenti ad un nodo. Rappresenta il numero di link che un nodo condivide con gli altri nodi (Freeman, 1977, 1978).	Importanza legata al numero di connessioni del nodo: riflette la sua connettività.	Nel caso di grafi direzionati si può distinguere tra In-degree e Out-degree.
Closeness Centrality		Inverso della distanza minima media da un dato nodo a tutti gli altri nodi del grafo (Sabidussi, 1966).	Importanza legata alla prossimità rispetto a tutti gli altri nodi del grafo: riflette l'accessibilità di un nodo.	
Betweenness Centrality		Numero di cammini minimi che passano per un vertice (Freeman, 1978).	Importanza legata alla capacità di un nodo di connettere tutti gli altri nodi.	

Passando invece alla descrizione del network nel suo complesso importante misura è quella relativa ai cammini minimi, come suggerito da Wang et al. (2011). Tramite questa misura si possono costruire matrici che forniscono informazioni sulla lunghezza del cammino minimo tra ogni coppia di nodi ed anche calcolare una misura di efficienza come proposta da Latora e Marchiori (2001). Altre misure a livello di network sono quelle legate al concetto di connettività come l'indice Alpha e l'indice Gamma (Rodrigue, 2020). Il primo si riferisce al rapporto tra il numero di cicli presenti nel network e il numero massimo di cicli possibili. Il secondo, invece, considera il rapporto tra il numero osservato di archi e il numero massimo di collegamenti, nel caso quindi di un grafo completamente connesso.

Inoltre, dallo studio strutturale della rete si possono trarre informazioni importanti sulle componenti critiche di ogni network. In particolare, spesso in letteratura si osserva come cambia l'efficienza della rete quando viene rimosso un suo nodo (si veda ad esempio Latora e Marchiori, 2005). Di conseguenza, maggiore la perdita di efficienza causata dalla rimozione di un nodo, maggiore la criticità del nodo stesso.

Infine, l'analisi strutturale può essere utilizzata per studiare la robustezza di una rete di trasporto. In via generale, le analisi di robustezza si focalizzano sulla frazione critica di attacchi che un sistema può sopportare prima di collassare, ma nel caso delle reti stradali è necessario considerare che spesso la rete può sopportare un grande numero di attacchi prima di fallire completamente (Duan e Lu, 2014). Seguendo, tra gli altri, Schneider et al. (2011) e Duan e Lu (2014), per valutare la robustezza si può considerare la dimensione della giant component al susseguirsi degli attacchi al sistema. In particolare, si possono rimuovere

successivamente i nodi seguendo l'ordine dato sia dall'indice di Centralità (Degree) sia dall'indice di Betweenness.

3 L'applicazione all'Italia Nord Occidentale: il caso del ponte Morandi

Il grafo usato in questo studio per proporre un'applicazione empirica è stato costruito considerando la rete autostradale del Nord-Ovest italiano, come mostrato in Figura 1. Si noti che non sono stati considerati tutti i caselli della rete, bensì sono state considerate le intersezioni principali.¹ Inoltre, nel caso delle grandi città, come ad esempio Torino e Milano, è stato considerato un solo nodo rappresentativo dei diversi caselli di entrata e uscita dalla città stessa. Diversamente, per il nodo genovese sono stati inseriti i principali caselli autostradali in modo da poter condurre l'analisi ad un livello tale che permettesse di considerare la caduta del ponte Morandi.

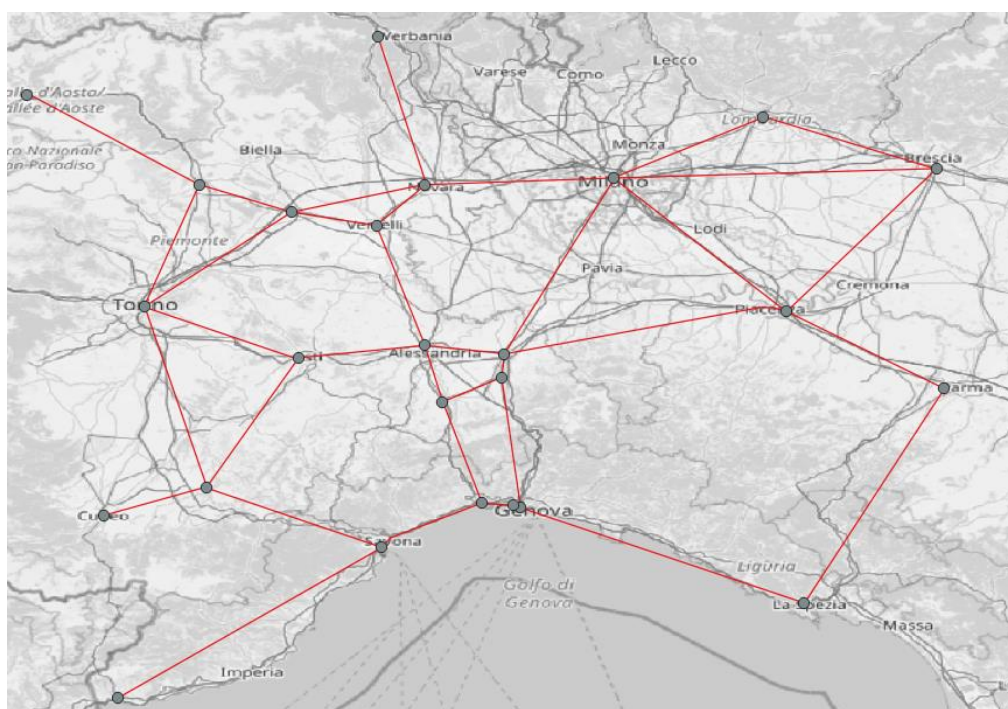


Figura 1. Network autostradale Nord-Ovest.

Il grafo, $Graph_m = (n_m, l_m)$, è un grafo simmetrico in cui ogni nodo, n_m , rappresenta un'uscita autostradale o un'intersezione, con $n_m = 1, \dots, 26$, e ogni arco, l_m , rappresenta un segmento autostradale, con $l_m = 1, \dots, 37$. Il peso assegnato ad ogni arco si riferisce alla distanza chilometrica tra i due nodi che esso collega.

Il primo indicatore calcolato è il Degree Centrality che descrive le caratteristiche basiche della rete. Il risultato dell'analisi viene mostrato in Figura 2, dove la grandezza dei nodi è proporzionale al grado, cioè al numero di link adiacenti ad ogni nodo, e lo spessore dei link è proporzionale alla distanza tra i due nodi che esso collega. Si identificano facilmente i nodi che sono collegati alla rete tramite un solo link, cioè Ventimiglia, Aosta, Gravellona Toce e Cuneo. Vi sono poi altri cinque nodi con grado 2, e nove nodi con grado 3. Il nodo di Milano è quello con il grado più alto, con 5 link adiacenti, seguito dai nodi con grado 4: Alessandria, Torino, Piacenza, Novara, Tortona, Santhià e Carrù.

¹ Talvolta alle intersezioni corrisponde un casello autostradale, mentre in altri casi all'intersezione viene dato il nome del comune ad essa più vicino. Esempi sono Bettole di Tortona e Predosa, per indicare rispettivamente i punti di inizio e fine del raccordo autostradale A26-A7.

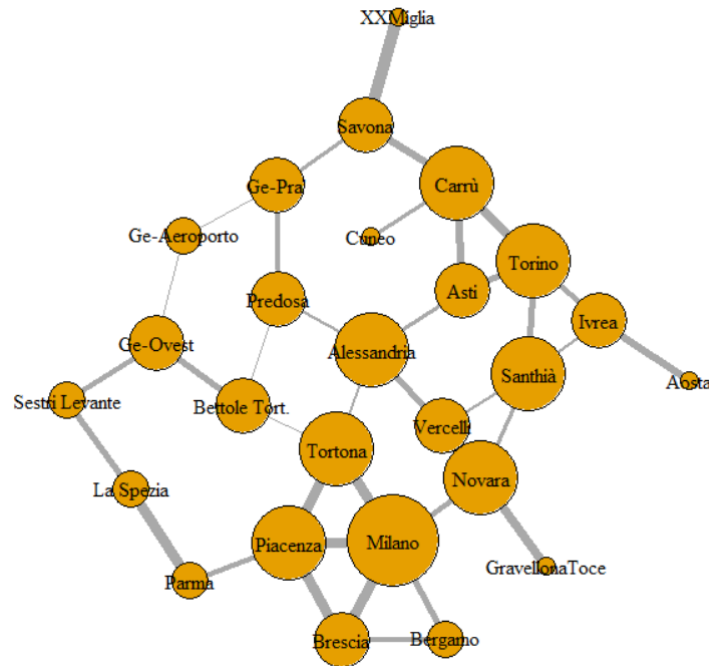


Figura 2. Degree Centrality

Mentre l'analisi del Degree ci fornisce un'istantanea sulla struttura della rete, gli indici di Closeness e di Betweenness possono servire come ulteriori strumenti di studio. A tal proposito, può essere interessante osservare la variazione dei valori degli indicatori prima e dopo la rimozione di alcune componenti del network per osservare l'impatto che un danno può avere sulla "centralità" dei nodi non direttamente coinvolti. Come si è già sottolineato, in questo lavoro l'evento preso ad esempio è la caduta del ponte Morandi e perciò questo esercizio viene fatto osservando i cambiamenti nella rete prima e dopo la rimozione del segmento autostradale tra Genova-Aeroporto e Genova-Ovest. Entrambi gli indicatori vengono calcolati sia con sia senza pesi. Quando non vengono usati i pesi, viene considerato solo il numero di nodi per calcolare il cammino minimo e non viene considerata l'effettiva lunghezza dei link. In Figura 3 vengono mostrate le variazioni percentuali tra il periodo pre e post crollo nel valore dell'indice di Closeness.² In particolare, gli istogrammi tratteggiati si riferiscono all'indice calcolato sul grafo non pesato, mentre gli altri si riferiscono al grafo pesato. Dalla Figura emerge chiaramente che i caselli autostradali che hanno risentito maggiormente della caduta del Ponte sono quelli liguri: la variazione percentuale è molto superiore ai valori medi (istogrammi rossi) che si assestano tra il 3 e il 4%.

² Si noti che l'indicatore è costruito come l'inverso della media dei percorsi minimi e una variazione percentuale negativa indica che la media dei percorsi minimi è aumentata.

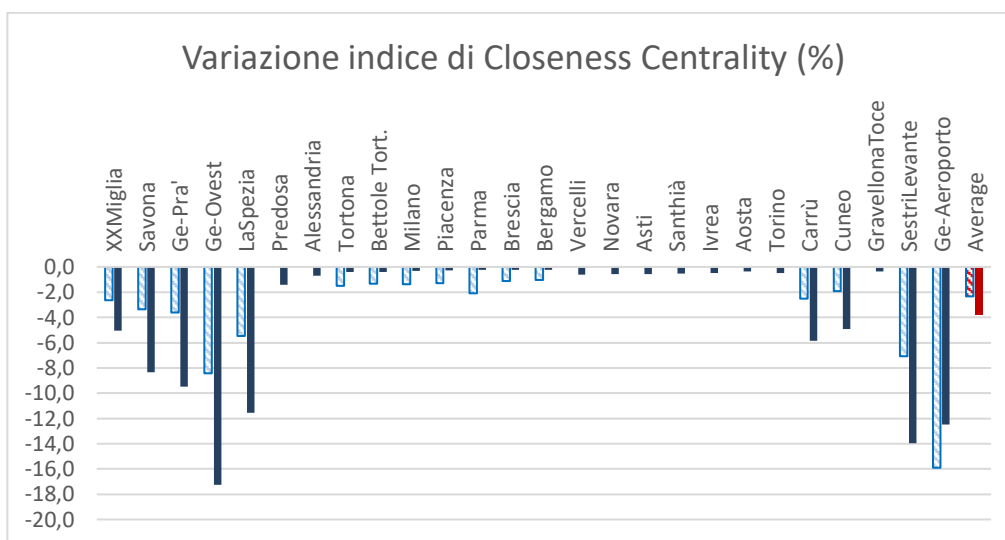


Figura 3. Closeness Centrality – Variazione pre-post crollo Ponte

Invece, i risultati relative all'indice di *Betweenness Centrality* sono riportati in Figura 4 dove, ancora una volta, gli istogrammi tratteggiati si riferiscono all'indice non pesato, mentre quelli pieni all'indice pesato. Il grafico mostra che il crollo del ponte Morandi ha portato ad un aumento nella centralità dei nodi vicino a Genova, cioè Alessandria, Asti, Tortona and Bettole di Tortona, dal momento che questi connettono i nodi localizzati nella parte Ovest della Liguria con i nodi nella parte Est della rete.³

L'analisi può essere approfondita andando ad analizzare ogni singolo cammino minimo, come ad esempio quello tra Ventimiglia e La Spezia. Il pannello A della Figura 5 rappresenta la configurazione antecedente alla caduta del ponte evidenziando che il cammino minimo passava per il nodo di Genova-Aeroporto, mentre il pannello B mostra che successivamente al crollo del Ponte questo nodo diventa pendente. Il cammino minimo aumenta da 257 km a 366 km. Questo rappresenta un aumento molto significativo nella distanza tra i nodi a Est e quelli a Ovest della Liguria nel caso in cui i veicoli rimanessero sul tratto autostradale senza optare per attraversare il territorio comunale di Genova utilizzando le strade urbane per poi rientrare in autostrada al casello di Genova-Prà. Importante sottolineare che questa deviazione è particolarmente costosa in termini monetari ma anche di tempo, soprattutto per i mezzi pesanti.

³ Le variazioni dell'indice di *Betweenness Centrality* sono calcolate escludendo i nodi pendenti che, per definizione, non si presentano mai su un percorso minimo e il nodo "Bergamo" che, pur non essendo pendente, presenta un indice pari a zero, sia prima che dopo il crollo del ponte. Inoltre, il nodo Genova-Aeroporto non viene mostrato in quanto, a causa del crollo del Ponte, è diventato esso stesso pendente (presentando quindi una variazione negativa del 100%).

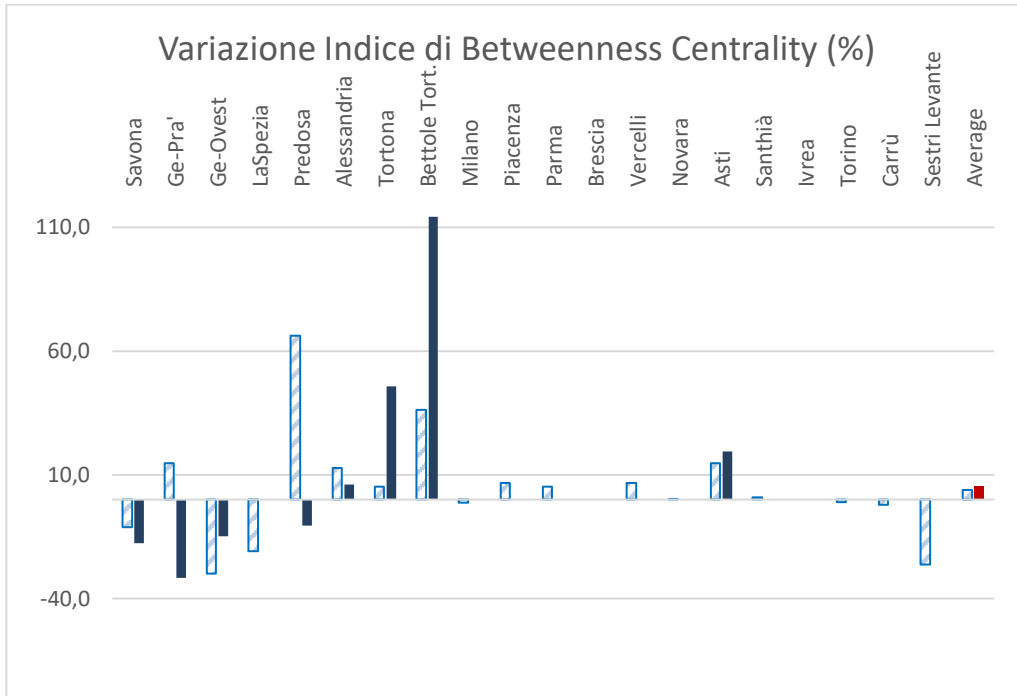


Figura 4. Betweenness Centrality – Variazione pre-post crollo Ponte

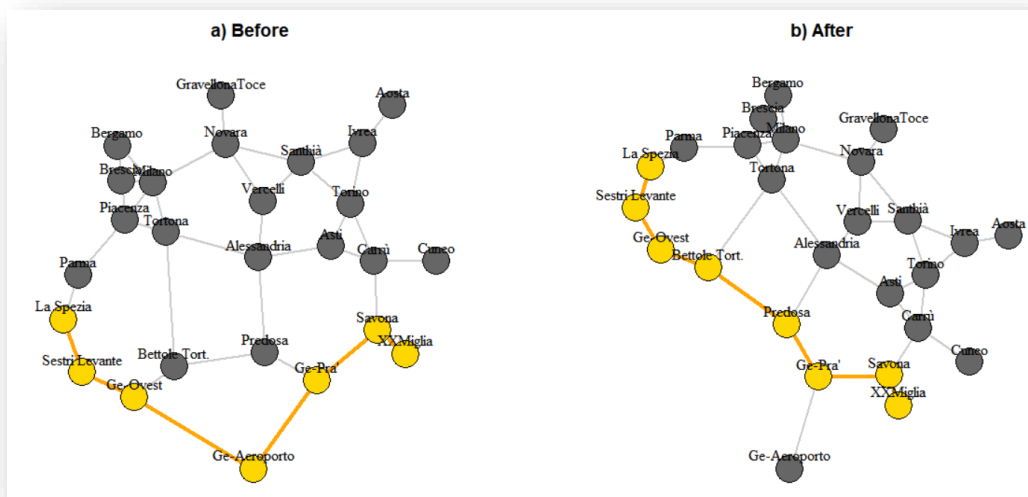


Figura 5. Cammino minimo tra Ventimiglia e La Spezia, prima e dopo la caduta del Ponte

Passando all'analisi macroscopica della rete, si presentano di seguito i risultati ottenuti tramite lo studio dei cammini minimi totali della rete. Dopo aver calcolato la matrice dei cammini minimi per tutte le coppie di nodi prima e dopo la caduta del Ponte, è stata misurata la variazione percentuale dei cammini minimi totali media della rete e poi anche per ogni singolo nodo (Figura 6). L'aumento percentuale medio è pari a 4%. I nodi Liguri, come atteso, mostrano valori molto superiori alla media: il nodo di Genova-Ovest registra un aumento del 21%, seguito da Sestri Levante (+16%), Genova-Aeroporto (+14%), La Spezia (+13%),

Genova-Pra' (+10%), Savona (+9%), e Ventimiglia (+5%). Interessante notare che anche due nodi del Piemonte registrano un aumento sostanziale: Carrù (+6%) e Cuneo (+5%).

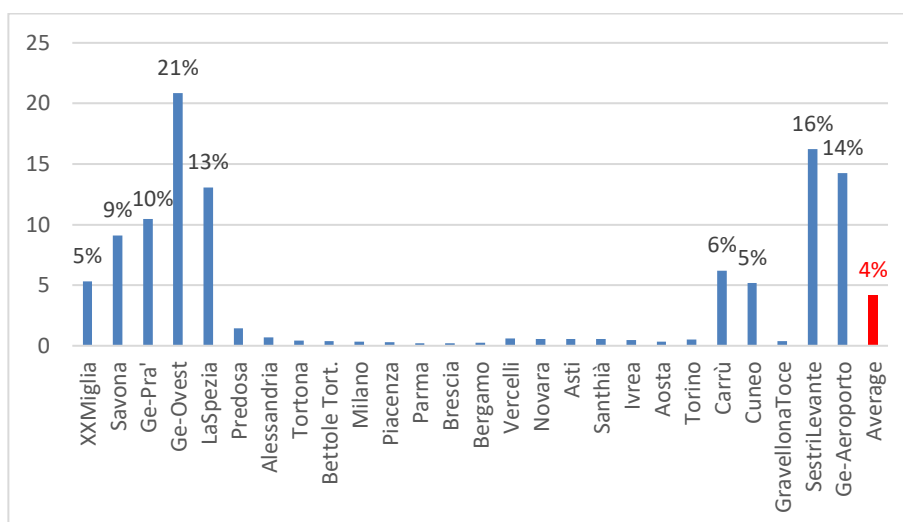


Figura 6. Variazione nei cammini minimi valore medio e valori a livello di nodo.

Infine, per concludere vengono mostrati i risultati ottenuti riguardo l'analisi di vulnerabilità e robustezza della rete. In primo luogo, è stata condotta un'analisi di vulnerabilità per comprendere i nodi e i link più critici della rete in termini di perdita di efficienza. Rimuovendo un nodo alla volta, infatti, è possibile comparare l'efficienza della rete prima e dopo la rimozione. I risultati di questa analisi vengono rappresentati in Figura 7. I nodi che comportano una maggior perdita di efficienza quando rimossi sono proprio quelli che sono stati interessati dalla caduta del ponte Morandi, seguiti da un altro nodo genovese, Genova-Prà.

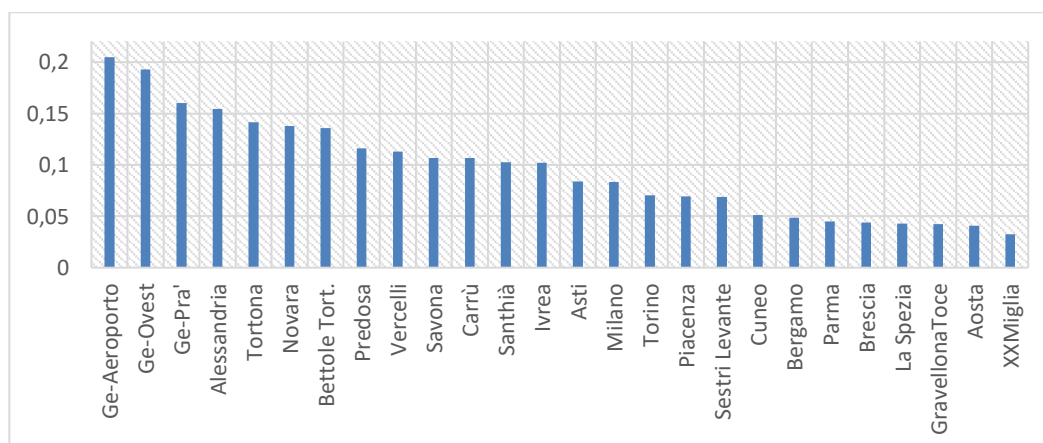


Figura 7. Perdita di efficienza dovuta alla rimozione dei singoli nodi della rete.

L'analisi è stata poi replicata rimuovendo un link alla volta in modo da individuare i segmenti più critici in termini di vulnerabilità. I risultati sono mostrati in Figura 8 dove la grandezza dei nodi rilette il grado, mentre lo spessore degli archi la criticità in termini di vulnerabilità, ossia la dimensione è proporzionale alla perdita di efficienza associata alla rimozione dell'arco in questione. Ancora una volta, la regione Liguria è quella che mostra maggiore criticità: rimuovendo il collegamento autostradale tra Genova-Aeroporto e Genova-Ovest si registra una perdita di efficienza del 12%, mentre la perdita nel caso del tratto tra Genova-Prà e Genova-Aeroporto è pari all'8%. Tra gli archi che portano ad una perdita tra il 4 e il 5% vi sono poi altri due tratti liguri, quello tra Genova-Prà e Savona e quello tra Genova-Ovest e Sestri Levante.

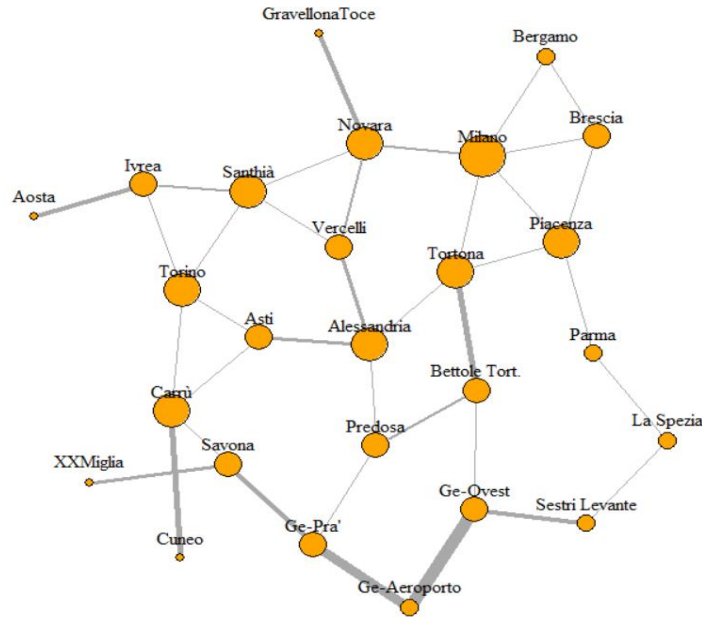


Figura 8: Perdita di efficienza dovuta alla rimozione dei singoli link della rete.

I risultati dell'analisi di robustezza sono mostrati in Figura 9, dove sull'asse delle x viene indicata la percentuale di nodi rimossi, mentre sull'asse delle y viene mostrato il rapporto tra la grandezza della massima componente rimasta (giant component) e la grandezza della massima componente nel grafo iniziale.

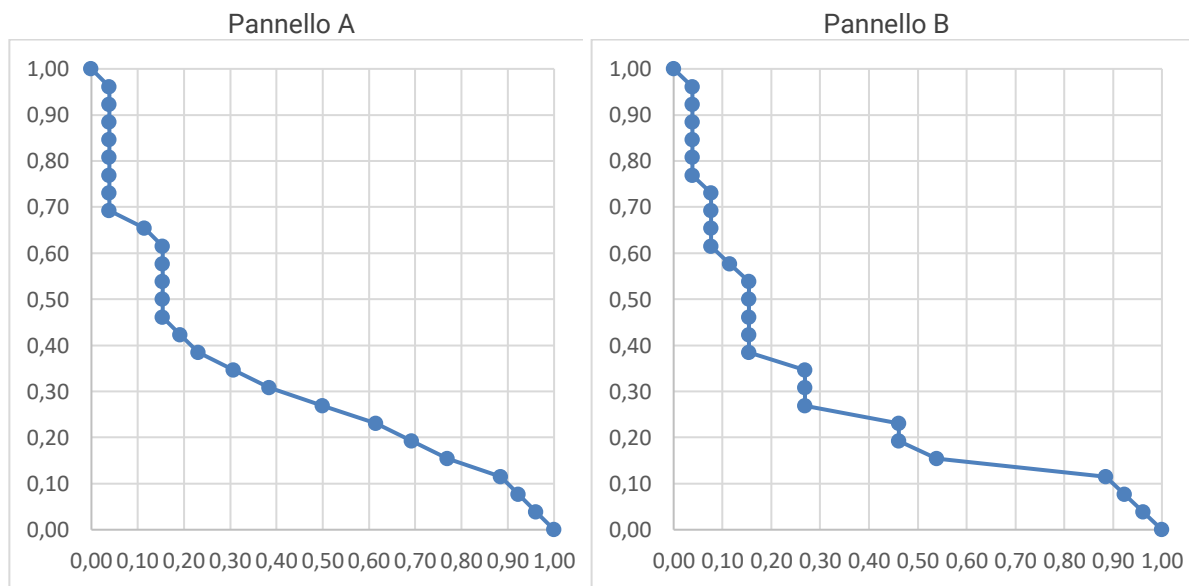


Figura 9: Analisi di Robustezza della rete

I nodi vengono rimossi sia seguendo l'ordine dato dal Degree (Pannello A) sia seguendo l'ordine dato dall'indice di Betweenness (Pannello B). In entrambi i pannelli risulta chiaro che vi è un forte ridimensionamento della massima componente nella fase iniziale del processo, cioè quando i nodi più centrali vengono rimossi. Nel pannello di sinistra, quando il 10% dei

nodi viene rimosso le dimensioni della giant component diminuisce di circa il 35%, mentre nel pannello di destra, per la stessa percentuale di nodi rimossi, si osserva una diminuzione della massima componente di circa il 40%.

4 Raccomandazioni

L'analisi condotta mostra che lo studio strutturale di una rete di trasporto può essere molto informativa. Nonostante non vengano inclusi gli aspetti dinamici, altrettanto importanti, quest'analisi può scattare un'istantanea delle componenti della rete, soprattutto riguardo la loro criticità. Come è già stato evidenziato, per una gestione efficace delle emergenze si rende necessaria, tra le altre cose, una conoscenza profonda delle caratteristiche statiche della rete. Questo tipo di analisi permette, infatti, valutazioni ex ante di numerosi indicatori che mostrano quanto grave e quanto esteso possa essere l'effetto di un'emergenza in base al punto geografico dove questa si verifica. A questo si possono aggiungere strumenti capaci di risolvere problemi di assegnazione dei flussi di traffico sul network, e ciò permetterebbe un'analisi comparata tra il prima e il dopo un evento emergenziale in modo da comprendere quali porzioni della rete possono subire effetti indiretti. Oltre a permettere interventi più immediati ed efficaci in caso di necessità, l'analisi strutturale può servire da base per possibili piani di miglioramento della rete stessa. Proprio in relazione al tema della robustezza, un'analisi accurata può portare a considerazioni importanti sulla possibilità di attuare degli interventi per rendere la rete più robusta. A tal proposito, si rendono necessarie alcune precisazioni. In questo lavoro è stata portata ad esempio la sola rete autostradale, ma le infrastrutture di trasporto possono essere interdipendenti tra loro e tenere in considerazione questo fattore aggiunge un grande livello di dettaglio. Un esempio tipico di interdipendenza che può interessare le reti di trasporto è l'interdipendenza geografica (si veda Rinaldi et al., 2001). In questo caso si può pensare all'esempio di una rete ferroviaria e una rete stradale che pur non dipendendo l'una dall'altra per il loro funzionamento sono interdipendenti perché i loro elementi sono spazialmente vicini. Esempio tipico può essere un viadotto che passa sopra una rete ferroviaria: si pensi al fatto che il crollo del ponte Morandi ha causato l'interruzione della linea ferroviaria sottostante. L'interdipendenza può anche essere di tipo funzionale (Zhang and Peeta, 2011) e questo è il caso di reti di trasporto multimodali in cui i bisogni degli utenti che utilizzano un sistema vengono soddisfatti, almeno parzialmente, da un altro sistema. Come è stato sostenuto in letteratura (Buldyrev et al., 2010; Vespignani, 2010) il fallimento di un network multilivello avviene ad una scala di danno inferiore rispetto a quando si analizza il comportamento individuale di ciascuna rete. Queste considerazioni sono molto rilevanti all'interno del dibattito sulla regolazione e il coordinamento delle autorità dal momento che spesso le infrastrutture sono gestite da operatori diversi che non sono coordinati nel prendere le decisioni.

5 Conclusioni

In questo lavoro è stato approfondito il tema dell'analisi statica delle reti di trasporto, con particolare attenzione all'importanza di questa tipologia di analisi in funzione di una gestione efficace di eventi emergenziali che possono verificarsi su una rete. In particolare, sono stati mostrati quali indicatori, sia a livello microscopico sia a livello di rete globale, possono essere importanti nell'ambito delle analisi strutturali. L'analisi empirica proposta, poi, rappresenta un esempio di come questi indicatori possono essere applicati allo studio di una rete reale. In questo studio è stata utilizzata la rete autostradale del Nord-Ovest italiano ed è stato preso ad esempio il caso del crollo del ponte Morandi avvenuto nel 2018 a Genova. L'analisi rivela che gli indicatori possono fornire una conoscenza ex ante dello stato della rete sia in termini di centralità dei nodi della rete sia in termini di vulnerabilità e robustezza della rete stessa. Lo studio rivela che una buona conoscenza delle caratteristiche della rete può mostrarsi fondamentale nella gestione delle emergenze ma anche per eventuali interventi di miglioramento del sistema di trasporto, soprattutto in termini di robustezza. Come è stato

evidenziato, però, anche l'analisi dinamica della rete rappresenta un importante strumento per i policy maker e i gestori dell'infrastruttura, e per questo le due analisi, statica e dinamica, dovrebbero essere considerate in termini di complementarità l'una rispetto all'altra. Infine, lo studio evidenzia che il tema dell'interdipendenza delle reti è un tema centrale che non può rivestire un ruolo marginale all'interno delle analisi delle infrastrutture di trasporto. Concetti quali l'interdipendenza geografica e funzionale rappresentano concetti chiave da tenere in considerazione nelle valutazioni dell'infrastruttura e ciò rappresenta una sfida per le future ricerche in questo ambito.

Riconoscimenti

Questo documento è stato prodotto nell'ambito di un progetto finanziato dall'Unione Europea attraverso il Programma di Sostegno alle Riforme Strutturali e realizzato dal CIELI - UniGe, in collaborazione con la Commissione Europea. Le opinioni espresse sono quelle dell'autrice e non rappresentano la posizione ufficiale della Commissione europea.

References

- Afraz, N., Aquilina, M., Conti, M and Lilico, A. (2006) "Impact of Transport Infrastructure on Economic Growth." Annex 6 to Final Report of COMPETE: Analysis of the Contribution of Transport Policies to the Competitiveness of the EU Economy and Comparison with the United States, Karlsruhe, ISI.
- Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E. and Havlin, S. (2010) "Catastrophic cascade of failures in interdependent networks", *Nature* 464(7291), 1025–1028.
- Dong, S., Wang, H., Mostafizi, A. and Song, X. (2020) "A network-of-networks percolation analysis of cascading failures in spatially co-located road-sewer infrastructure networks", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 538, 122971.
- Duan, Y. and Lu, F. (2014) "Robustness of city road networks at different granularities", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 411, 21–34.
- Ferrari, C., Bottasso, A., Conti, M. and Tei, A. (2018) *Economic Role of Transport Infrastructure: Theory and Models*. Amsterdam: Elsevier.
- Freeman, L.C., (1977) "A set of measuring centrality based on betweenness", *Sociometry* 40, 35–41.
- Freeman, L.C., (1978) "Centrality in social networks: conceptual clarification", *Social Networks* 1 (3), 215–239.
- Latora, V. and Marchiori, M. (2001) "Efficient behavior of small-world networks", *Physical review letters* 87(19), 198701.
- Latora, V. and Marchiori, M. (2005) "Vulnerability and protection of infrastructure networks", *Physical Review E* 71(1), 015103.
- Mattsson, L.-G. and Jenelius, E. (2015) "Vulnerability and resilience of transport systems—a discussion of recent research", *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81, 16–34.
- Nagurney, A., Qiang, Q. (2012) "Fragile networks: identifying vulnerabilities and synergies in an uncertain age", *Int. Trans. Oper. Res.* 19, 123–160.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. and Kelly, T. K. (2001) "Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies", *IEEE control systems magazine* 21(6), 11–25.
- Rodrigue, J.-P. 2020. *The geography of transport systems* (5th ed.), Routledge.
- Schneider, C. M., Moreira, A. A., Andrade, J. S., Havlin, S. and Herrmann, H. J. (2011) "Mitigation of malicious attacks on networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(10), 3838–3841.



- Vespignani, A. (2010) “The fragility of interdependency”, *Nature* 464(7291), 984–985.
- Von Ferber, C., Holovatch, T., Holovatch, Y. and Palchykov, V. (2009) “Public transport networks: empirical analysis and modelling”, *The European Physical Journal B* 68(2), 261–275.
- Wang, J., Mo, H., Wang, F. and Jin, F. (2011) Exploring the network structure and nodal centrality of China’s air transport network: A complex network approach. *Journal of Transport Geography*, 19(4), pp.712-721.
- Zhang, P. and Peeta, S. (2011) “A generalized modeling framework to analyze interdependencies among infrastructure systems”, *Transportation Research Part B: Methodological* 45(3), 553–579.