



Progettazione di rotatorie sicure per il Transito delle Metropolitane Leggere (LRT)

Design of safe Light Rail Transit (LRT) roundabouts

Dott. Ing. Margarita NOVALES^(*)
Dott. Ing. Christian M. MARTI^(**)
Dott. Ing. Manuel TEIXEIRA^(***)
Dott. Ing. Dominique SCHMITT^(****)
Dott. Ing. Franck MONTI^(*****)
Dott. Ing. Reddy MORLEY^(*****)
Dott. Ing. Laetitia FONTAINE^(*****)

Sommario - Nella circolazione a livello nelle aree urbane, un sistema di metropolitana leggera (LRT) deve attraversare intersezioni stradali di varia complessità. Queste intersezioni, tra cui le rotatorie, sono le principali aree sensibili (punti rischiosi) nelle reti LRT. Esistono diversi documenti relativi al trattamento delle intersezioni LRT convenzionali per garantire la sicurezza, ma quasi nessun riferimento alla progettazione di rotatorie LRT, fatta eccezione per le linee guida francesi. Questo documento affronta i problemi di sicurezza legati alla progettazione di una rotonda LRT. Il documento contiene, in primo luogo, la spiegazione delle differenze tra la gestione della rotonda con e senza una metropolitana leggera (LRT) che la attraversa, e le conseguenze del comportamento dei conducenti di veicoli su strada. In secondo luogo, si discute l'opportunità di utilizzare una rotonda nell'inserimento di una LRT in una specifica intersezione. Infine, si presentano le principali considerazioni per la progettazione di una rotatoria LRT sicura, tenendo conto degli aspetti generali come la visibilità, la percezione e la protezione, e quelli più specifici, come l'inserimento adeguato della LRT nella rotatoria, le sue dimensioni e il numero di corsie, così come alcuni miglioramenti semaforici che possono aumentare la sicurezza. Inoltre, alla fine del docu-

Summary - While travelling at-grade in an urban environment, a Light Rail Transit (LRT) system needs to traverse road intersections of various complexities. These intersections, including roundabouts, are major hotspots (risky points) in LRT networks. There are several documents related to the treatment of conventional LRT intersections for guaranteeing safety, but almost no reference to LRT roundabouts design, except for the French guidelines. This paper addresses safety issues related to LRT roundabout design. The paper contains, firstly, the explanation of the differences between the roundabout management without and with an LRT running through it, and the consequences for road vehicle drivers' behavior. Secondly, the appropriateness of using a roundabout in the insertion of an LRT in a specific intersection is discussed. Finally, the main considerations for designing a safe LRT roundabout are presented, taking into account general aspects such as visibility, perception and protection, and more specific ones such as the adequate insertion of the LRT in the roundabout, its size and number of lanes, as well as some traffic light improvements that may enhance safety. Additionally, some real case examples are presented at the end of the paper to illustrate how the safety of a given LRT roundabout can be improved once it has been built.

^(*) Ingegnere Civile, Professore Associato Ferrovie. Università di A Coruña.

^{(**) Istituto per la Progettazione e Sistemi di Trasporto, ETH Zurich.}

^{(***) Consulente Indipendente Mobilità e Trasporti.}

^{(****) Transamo.}

^{(*****) Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).}

^(*****) Infrastruttura di Trasporto Irlanda.

^{(******) STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés).}

^{(*) Civil Engineer, PhD. Railways Associate Professor. University of A Coruña.}

^{(**) Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zurich.}

^{(***) Mobility and Transport Independent Consultant.}

^{(****) Transamo.}

^{(*****) Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).}

^(*****) Transport Infrastructure Ireland.

^{(******) STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés).}

mento si presentano alcuni esempi di casi reali per illustrare come la sicurezza di una determinata rotonda LRT può essere migliorata una volta che è stata costruita.

1. Introduzione

Nella circolazione a livello nelle aree urbane, un sistema di Metropolitana Leggera (LRT) deve attraversare intersezioni stradali di varia complessità. Per un buon inserimento del sistema LRT in ambiente urbano, queste intersezioni a raso devono essere considerate come incroci stradali anziché passaggi a livello, ad eccezione del caso di velocità elevate di LRT o di sistemi completamente separati.

Guidare attraverso un incrocio o una rotatoria è una questione complicata e di solito comporta manovre complesse, durante le quali tutti gli utenti della strada (automobilisti, ciclisti, pedoni e conducenti di Metropolitane Leggere - LRV) devono valutare continuamente le posizioni, le velocità e le intenzioni degli altri utenti della strada. Di conseguenza, le intersezioni a raso e le rotatorie sono solitamente considerate delle aree sensibili (punti rischiosi) nelle reti LRT. L'Azione TU1103 COST (Cooperazione Europea in Scienza e Tecnologia), "Funzionamento e sicurezza di tranvie in interazione con lo spazio pubblico", ha confermato questa ipotesi.

Tale Azione COST ha affrontato il miglioramento della sicurezza di tram e Metropolitana Leggera (LRT) attraverso una migliore gestione e progettazione del loro inserimento negli spazi urbani. Hanno partecipato all'Azione trentaquattro entità da 14 diversi paesi Europei (oltre a Israele). I partecipanti includevano agenzie LRT, enti di gestione della sicurezza e istituti di ricerca e l'UITP (Associazione Internazionale del Trasporto Pubblico).

Uno degli aspetti studiati durante tale Azione COST è stata l'individuazione delle aree sensibili, definite come "Un luogo nella zona urbana dove si verificano la maggior parte degli incidenti o collisioni in un determinato periodo di tempo". Come si può vedere nella relazione finale dell'Azione COST [1], così come in [2, 3], durante l'Azione è stato somministrato un questionario a 24 operatori provenienti da 13 paesi diversi sull'identificazione delle aree sensibili. Sono state analizzate informazioni su 89 aree sensibili, e la maggior parte di loro (85%) riguardavano intersezioni a raso (comprese le rotatorie). Di conseguenza, bisogna prestare particolare attenzione nel determinare il tracciato e l'adeguata progettazione di ciascuna intersezione a raso di una rete/linea LRT.

Diverse pubblicazioni si concentrano sulle intersezioni LRT a raso. Come riferimento, in [4] sono presentati diversi trattamenti per incroci stradali LRT dove le LRV funzionano a una velocità superiore a 55 km orari, mentre [5] si concentra sui sistemi che viaggiano a velocità più basse. Nel [6] si discute sulla comprensione della segnalazione. In [7] si studiano varie misure per migliorare la sicurezza LRT, compresa l'individuazione di alcune reti US dove sono state implementate. Inoltre, in [8, 9, 10] so-

1. Introduction

While travelling at-grade in an urban environment, a Light Rail Transit (LRT) system needs to traverse road intersections of various complexities. For a good insertion of the LRT system in the urban environment, these at-grade intersections should be regarded as roadway intersections rather than railway level crossings, except for the case of high LRT speeds or fully separated systems.

Driving through an intersection or a roundabout is a complicated matter and usually involves complex maneuvers during which all street users (motorists, cyclists, pedestrians and LRV-Light Rail Vehicle- drivers) must continuously assess the positions, speeds and intentions of other street users. Consequently, at-grade intersections and roundabouts are usually considered as major hotspots (risky points) in LRT networks. The COST (European Co-operation in Science and Technology) Action TU1103, "Operation and safety of tramways in interaction with public space", has corroborated this assumption.

This COST Action dealt with the improvement of streetcar and Light Rail Transit (LRT) safety through a better management and design of their insertion into urban spaces. Thirty-four entities from 14 different European countries (plus Israel) participated in the Action. Participants included LRT agencies, safety management entities and research bodies, and the UITP (International Association of Public Transport).

One of the aspects studied during this COST Action was the identification of hotspots, defined as "A place in the urban area where the most accidents or collisions occur in a fixed period of time". As can be seen in the final report of the COST Action [1], as well as in [2, 3], a questionnaire on hotspot identification was conducted during the Action among 24 operators from 13 different countries. Information about 89 hotspots was analyzed, and the majority of them (85%) were at-grade intersections (including roundabouts). Consequently, special attention should be given in determining the layout and the adequate design of each at-grade intersection of an LRT line/network.

Several publications are focused on LRT at-grade intersections. As reference, several treatments for LRT road intersections where LRVs run at a speed higher than 55 km/h are presented in [4], while [5] focuses on systems running at lower speeds. A discussion about signalization understanding is made in [6]. In [7] several measures for improving LRT safety are studied, including the identification of some US networks which applied them. Additionally, several measures for improving left-turn intersections safety or for avoiding violation at prohibited left-turn locations are presented in [8, 9, 10]. Finally, hook-turn management of right-turns crossing LRT tracks in Australia (where road vehicles drive on the left) is discussed in [11].

Although LRT roundabouts have also been identified as important hotspots, as reported in the Abstract there is almost no reference in scientific literature to this kind of in-

no presentate una serie di misure per migliorare la sicurezza delle intersezioni con svolta a sinistra o per evitare la violazione di punti di divieto di svolta a sinistra. Infine, in [11] si tratta la gestione delle svolte ad uncino a destra che attraversano i binari LRT in Australia (dove i veicoli stradali hanno la guida a sinistra).

Sebbene le rotatorie LRT siano state anche identificate come aree sensibili importanti, come riportato nel sommario, non vi è quasi nessun riferimento nella letteratura scientifica a questo tipo d'intersezione, oltre a quelli relativi all'Azione COST. L'eccezione principale è nelle linee guida francesi sulle rotatorie LRT [12], in cui si presenta il punto di vista francese.

Questa mancanza di informazioni è il motivo per cui l'Azione COST ha affrontato approfonditamente questo argomento, ed il motivo per cui questo documento è incentrato sulle rotatorie LRT.

Gli autori ringraziano la European Cooperation in Science and Technology (COST) per il finanziamento della COST Action 1103, e tutti i membri della Action, oltre ad altri partecipanti, per le informazioni fornite ed il lavoro svolto. Senza il loro contributo, non sarebbe stato possibile scrivere questo articolo.

2. Differenze nella gestione delle rotatorie con e senza LRT

La rotatoria è un incrocio circolare nel quale il traffico stradale scorre in una direzione su una strada circolare intorno a un'isola centrale. Normalmente, non è provvista di semafori e il traffico in entrata dà sempre la precedenza al traffico già presente sulla strada circolare [13].

In alcuni paesi europei le rotatorie sono una soluzione molto comune per le intersezioni senza LRT. Il loro vantaggio principale è quello di provvedere a un flusso di traffico sicuro e quasi continuo. Inoltre, sono punti versatili che offrono, ad esempio, le seguenti possibilità:

- trasformano la svolta a sinistra in svolta a destra, evitando interferenze con il traffico sul lato opposto e quello laterale;
- sono punti di inversione ad U;
- evitano di ricorrere ai semafori negli incroci a raso, eliminando i tempi morti e riducendo i costi di esercizio e di manutenzione;
- costringono i conducenti dei veicoli stradali a ridurre la loro velocità in avvicinamento.

Il funzionamento di una rotatoria cambia quando viene implementato un sistema LRT. Il modo consueto di includere una linea moderna LRT in una rotonda è con i binari che attraversano il suo centro, protetta da semaforo situato prima dei punti dove la strada circolare attraversa i binari LRT.

Nei sistemi esistenti di LRT, vi sono esempi di rotatorie dove la LRT non è protetta da semafori. Tuttavia que-

tersection, apart from the ones related to the COST Action. The main exception is the French guidelines on LRT roundabouts [12], where the French perspective is presented.

This lack of information is the reason why the COST Action has addressed this subject in depth, and why this paper is focused on LRT roundabouts.

Authors thank the European Cooperation in Science and Technology (COST) for funding the COST Action 1103, and all the members of the Action, as well as other contributors, for the data and work provided. Writing this paper would have not been possible without their inputs.

2. Differences in roundabout management without and with LRT

A roundabout is a circular intersection in which road traffic flows in one direction on a circular road around a central island. Normally, it does not include traffic lights and the incoming traffic always yields to the traffic already on the circular road [13].

Roundabouts are a very common solution for intersections without LRT in some European countries. Their main advantage is seen as providing a safe and almost continuous traffic flow. Furthermore, they are versatile points that offer, for example, the following possibilities:

- *they transform left turns into right turns, avoiding interference with opposite and side traffic;*
- *they are U turning points;*
- *they can avoid the need for traffic lights at an at-grade intersection, eliminating dead-times and reducing the operation and maintenance costs;*
- *they can force road vehicle drivers to reduce their speed when approaching.*

The roundabout operation changes when an LRT system is implemented. The usual way of including a modern LRT line in a roundabout is with the tracks running through its center, protected by traffic lights located before the points where the circular road crosses the LRT tracks.

There are examples, in existing LRT systems, of roundabouts where the LRT is not protected by traffic lights. Nevertheless, for new networks, this solution is not advisable. Possible exceptions concern very small roundabouts with low road traffic volume.

The way in which the usual LRT roundabout (with traffic lights) functions is as follows: the roundabout works conventionally when the LRV is not present or approaching (priority for road vehicles that are on the roundabout). Nevertheless, traffic lights are provided in the circular road of the roundabout, immediately before the crossing of the tracks, which give priority to approaching or present LRVs. This means that road vehicle drivers will have the priority while running on the roundabout only when the LRV is not in the vicinity, but have to yield (stop before the traffic lights) if an LRV is present or approaching.

sta soluzione non è consigliata per le nuove reti. Possibili eccezioni riguardano rotonde molto piccole con un basso volume di traffico stradale.

Il modo in cui funziona normalmente una rotonda LRT (con semaforo) è come segue: la rotonda funziona in maniera tradizionale quando la LRV non è presente o si avvicina (precedenza per i veicoli stradali che sono nella rotonda). Tuttavia, la strada circolare della rotonda è provvista di semafori, immediatamente prima dell'incrocio dei binari, che danno la precedenza alle LRV in avvicinamento o presenti. Questo significa che i conducenti dei veicoli stradali avranno la precedenza mentre circolano nella rotatoria solo quando la LRV non è nelle vicinanze, ma devono dare la precedenza (fermarsi prima del semaforo) se una LRV è presente o in avvicinamento.

Questi cambiamenti nelle precedenze inducono il conducente del veicolo stradale a spostare la sua attenzione quando circola sulla strada circolare, come mostrato nella fig. 1.

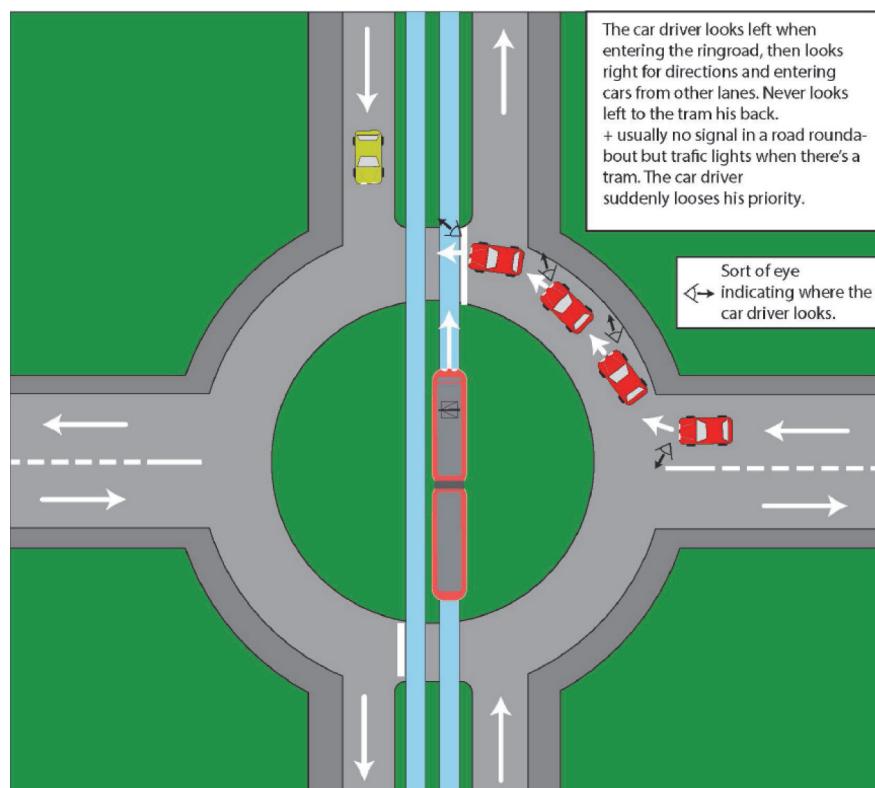
La situazione è ancora più complicata nel caso di rotatorie con più corsie. In questo caso, il numero di punti di conflitto tra veicoli aumenta. Una rotatoria con un progetto adeguato renderebbe inutile per i conducenti di veicoli stradali cambiare corsia per percorrere la rotatoria: dovrebbero essere in grado di scegliere la corsia appropriata prima dell'ingresso e rimanere in quella corsia attraverso la rotatoria fino all'uscita prevista senza eventuali cambi di corsia [14]. Tuttavia, il comportamento dei conducenti conduce a conflitti tra di loro in tre modi possibili (si veda [14] per maggiori dettagli): i conducenti non riescono a mantenere la posizione della corsia durante la circolazione sull'anello; i conducenti entrano nella rotatoria accanto ad un veicolo in uscita; i conducenti girano per uscire dalla rotatoria dalla corsia errata. Questi possibili conflitti rendono ancora più difficile per i conducenti di veicoli stradali concentrarsi sui cambiamenti nelle precedenze stabilite dai semafori (dando la precedenza alla LRV quando è presente).

Il cambiamento del funzionamento della rotonda quando è presente una LRV può causare problemi. Per esempio, in Francia il tasso di incidenti per rotatoria è molto più alto rispetto agli incroci tradizionali (fig. 2). Pertanto, in alcuni paesi, le rotatorie sono considerate pericolose. In altri paesi, questi problemi non sono così evidenti e le rotatorie sono considerate una valida opzione per casi specifici. È importante notare che per con-

These changes in priority lead to the need for the road vehicle driver to change his/her attention when running on the circular road, as shown in fig. 1.

The situation is even more complicated for the case of multilane roundabouts. In this case, the number of conflict points between vehicles increases. A roundabout with an adequate design would make it unnecessary for road vehicle drivers to change lanes to navigate the roundabout: they should be able to select the appropriate lane upstream of the entry and stay within that lane through the roundabout to the intended exit without any lane changes [14]. Nevertheless, road drivers' behavior leads to conflicts between them in three possible ways (see [14] for more detail): drivers fail to maintain lane position when running on the ringroad; drivers enter the roundabout next to an existing vehicle; drivers turn to exit the roundabout from the incorrect lane. These possible conflicts make it even more difficult for road vehicle drivers to focus on the changes in priority established by traffic lights (giving priority to the LRV when it is present).

The change of roundabout operation when an LRV is present can cause problems. For example, in France the accident rate per roundabout is much higher than for general intersections (fig. 2). Therefore, in some countries, roundabouts are regarded as unsafe. In other countries, these



(Fonte - Source: [1])

Fig. 1 - Conflitto della presenza LRT nella rotonda con la consueta attenzione dei conducenti di veicoli stradali.

Fig. 1 - Conflict of LRT presence in the roundabout with the usual attention of road vehicle drivers.

frontare il numero di incidenti tra i diversi tipi di configurazione, devono essere considerati diversi aspetti che possono influenzare i dati, come ad esempio il volume del traffico, la velocità dei veicoli coinvolti, il numero delle strade che convergono nell'intersezione e la loro configurazione.

3. Quando usare una rotonda in una rete LRT?

La domanda principale che emerge dalle considerazioni nella sezione 2 è: quando è ragionevole usare una rotonda in una linea LRT? La risposta generica è: non utilizzare rotatorie come soluzione generale, ma solo quando ci sono validi motivi che rendono questa configurazione più consigliabile di una tradizionale intersezione a raso controllata da semafori. Questi motivi sono legati ai movimenti che devono essere consentiti nel punto di intersezione, oppure alla configurazione delle strade che convergono verso la rotonda, e sono espressi nei paragrafi seguenti.

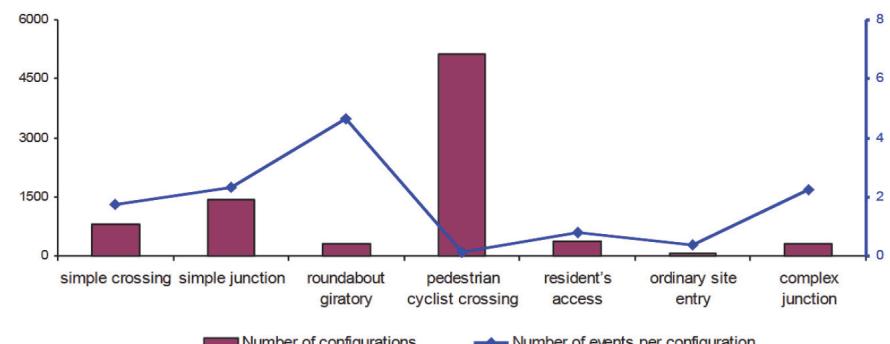
Tuttavia, quando si parla di movimenti che devono essere considerati in una specifica intersezione a raso, si dovrebbe eseguire uno studio della zona circostante. Ci sono molte occasioni in cui è possibile evitare un movimento specifico in un punto, consentendolo in maniera più facile e sicura nelle vicinanze (per esempio, permettere una svolta a sinistra in un altro incrocio, o aggirare i blocchi e facendo un incrocio perpendicolare della linea LRT [16]).

3.1. Rotatorie a tre bracci (intersezione a raso a T)

Nel caso di un incrocio a T, la disposizione di una rotonda non è consigliabile se i movimenti consentiti nell'incrocio sono quelli in nero nella parte in basso a sinistra della fig. 3. Tali movimenti possono essere garantiti da un incrocio con semaforo a ciclo a due fasi, che è più efficiente e più sicuro di una rotonda nel caso della LRT che la attraversa.

Se i movimenti nell'incrocio sono più complicati, avendo introdotto svolte a sinistra e/o inversioni a U in una o entrambe le direzioni (i movimenti in rosso nella parte in basso a destra della figura), la configurazione della rotonda dovrebbe essere considerata come possibilità, perché:

- tutti questi movimenti si trasformano in un incrocio perpendicolare dei binari, con una migliore visibilità, purché la rotonda sia ben progettata;
- il ciclo del semaforo per una intersezione a raso tradizionale sarebbe complicato, mentre la soluzione di una rotatoria è molto più semplice con i semafori che fermano i veicoli stradali solo quando la LRV è presente o in avvicinamento.



(Fonte - Source: [15])

Fig. 2 - Numero di eventi per configurazione nelle reti LRT francesi.
Fig. 2 - Number of events per type of configuration in French LRT networks.

problems are not as evident and roundabouts are considered a viable option for specific cases. It is important to note that for making comparisons in the number of accidents among different kinds of configuration, several aspects that may influence the data have to be considered, such as the traffic volume, the speed of the vehicles involved, the number of streets converging in the intersection and their configuration.

3. When to use a roundabout in an LRT network?

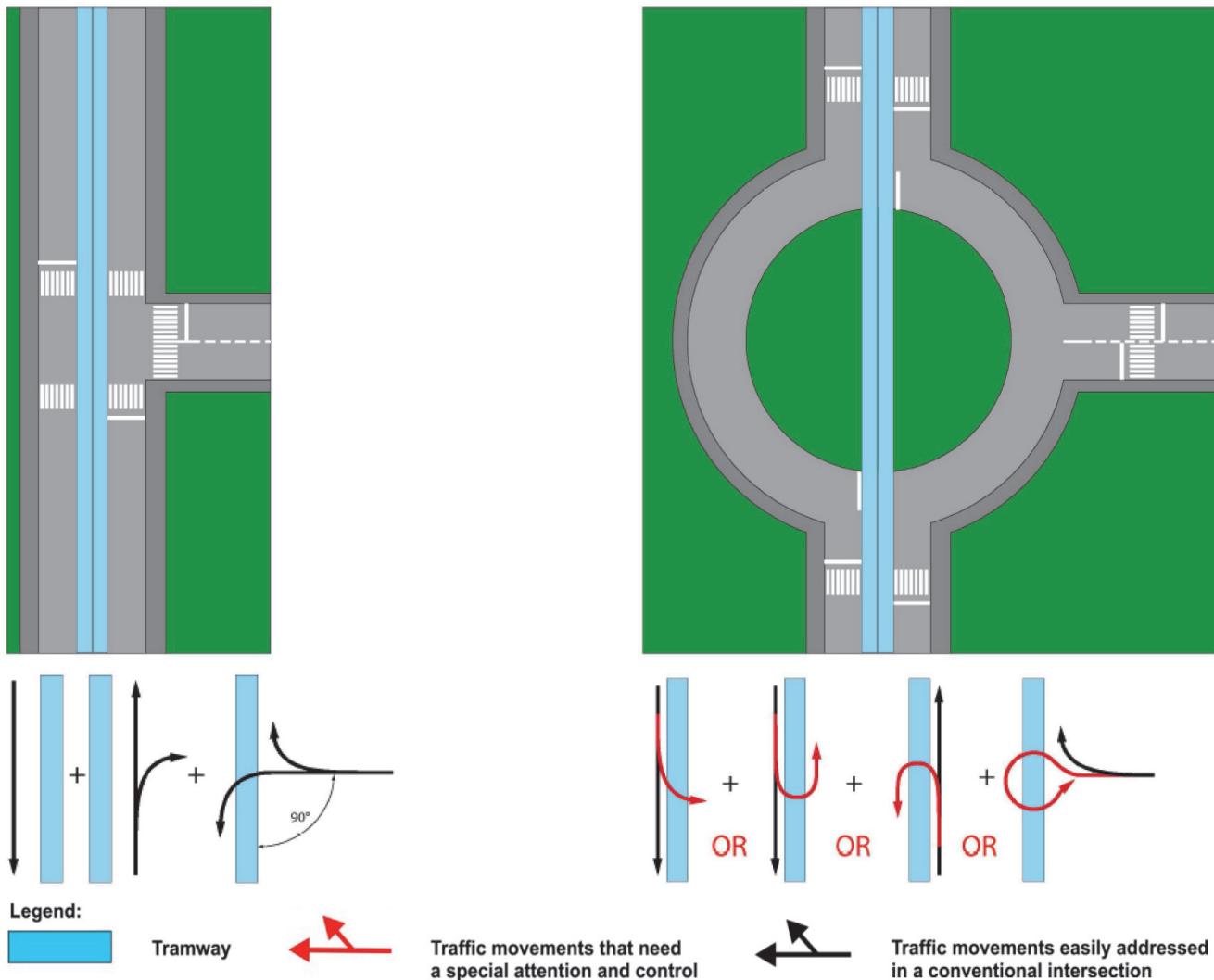
The main question that arises from the considerations in section 2 is: When is it reasonable to use a roundabout in an LRT line? The generic answer is: do not use roundabouts as a general solution, but only when there are strong reasons that make this configuration more advisable than a conventional at-grade intersection controlled by traffic lights. These reasons are related to the movements that need to be allowed at the intersection, or to the configuration of the streets that converge on the roundabout, and are stated in the following paragraphs.

Nevertheless, when thinking about the movements that need to be addressed in a specific at-grade intersection, a study of the surrounding area should be made. There are many occasions when it is possible to avoid a specific movement in one point, allowing it more easily and safely nearby (for example, allow a left turn at another intersection, or by circumventing the blocks and making a perpendicular crossing of the LRT line [16]).

3.1. Roundabouts with three arms (T at-grade intersections)

In the case of a T-intersection, a roundabout layout is not advisable if the movements allowed in the intersection are the ones in black in the lower left part of fig. 3. These movements can be accommodated by an intersection with two-phase cycle traffic lights, which is more efficient and safer than a roundabout for the case of the LRT running through it.

If the movements in the intersection are more compli-



(Fonte - Source: [1])

Fig. 3 - Situazione in cui è consigliato l'utilizzo di una rotonda in un incrocio a tre bracci.

Fig. 3 - Roundabout advisability in an intersection with three arms.

3.2. Rotatorie con quattro bracci

Considerazioni analoghe a quelle per le rotatorie con tre bracci si applicano a rotonde con quattro bracci (fig. 4). In questo caso, i movimenti neri della parte in basso a sinistra della figura possono essere garantiti da un ciclo semaforico a tre fasi. Ancora una volta, i movimenti rossi nella parte inferiore destra della figura possono essere trasformati in incroci perpendicolari di binari LRT con la realizzazione di una rotonda.

3.3. Rotatorie con cinque bracci, quattro bracci in direzione non perpendicolare, e altre configurazioni più complesse

Per ogni tipo di intersezione a raso dove le strade in entrata non sono perpendicolari, una rotatoria può essere

cated, introducing left-turns and/or U-turns in one or both directions (the movements in red in the lower right part of the figure), the roundabout configuration should be considered as an option, because:

- all these movements are transformed into a perpendicular crossing of the tracks, with a better visibility, as long as the roundabout is well designed;
- the traffic light cycle for a conventional at-grade intersection would be complicated, whereas the solution of a roundabout is much simpler with traffic lights stopping road vehicles only when the LRV is present or approaching.

3.2. Roundabouts with four arms

Similar considerations as for roundabouts with three

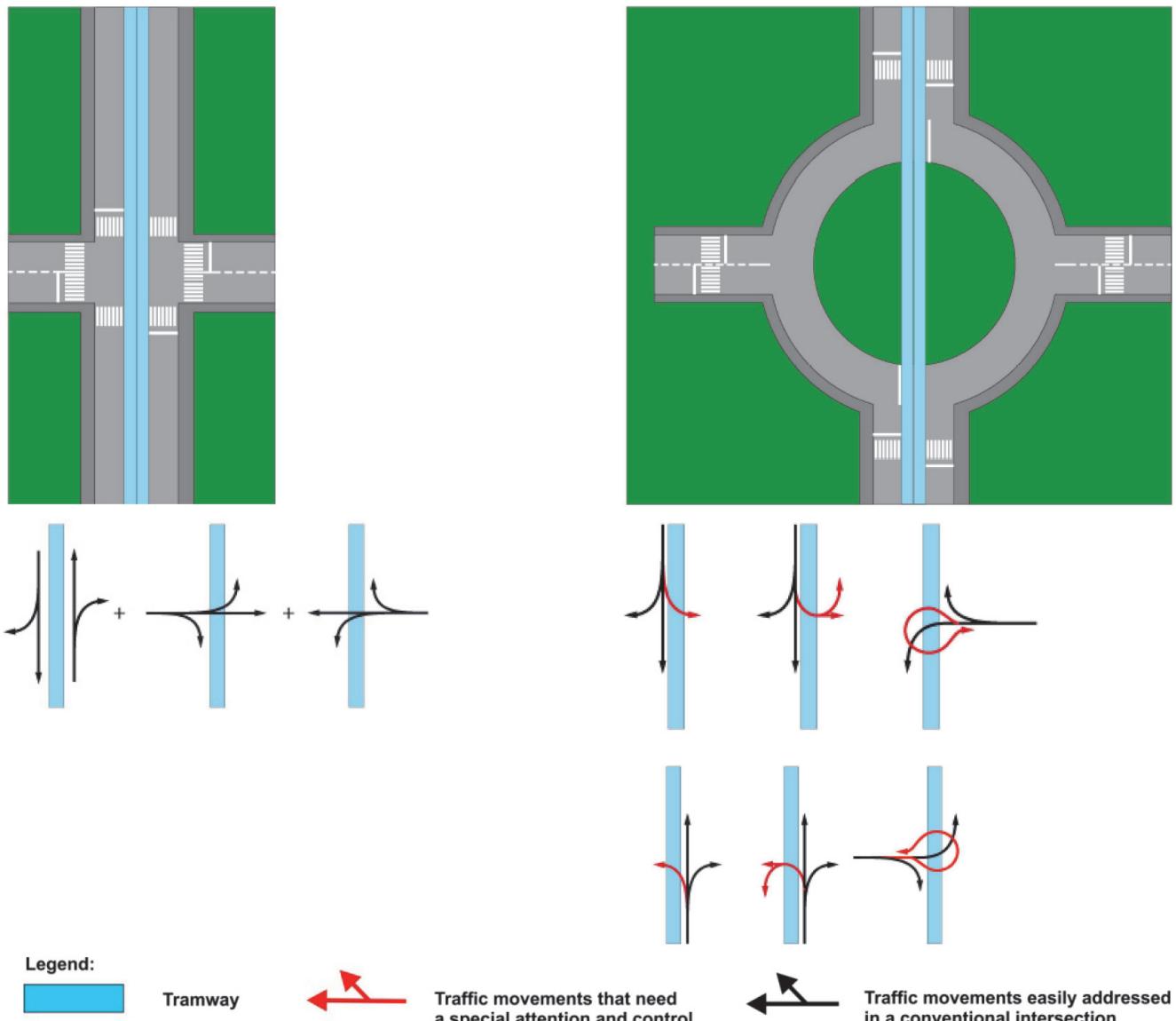


Fig. 4 - Situazione in cui è consigliato l'utilizzo di una rotonda in un incrocio a quattro bracci.

Fig. 4 - Roundabout advisability in an intersection with four arms.

(Fonte - Source: [1])

un modo di proteggere i binari LRT da incroci effettuati in una direzione non perpendicolare e le corrispondenti manovre più rischiose dovute alla mancanza di visibilità. In questo caso, se la rotonda è progettata correttamente (evitando di concentrarsi su troppe cose allo stesso tempo), ogni attraversamento dei binari sarà fatto in una direzione perpendicolare, migliorando la visibilità e la sicurezza. La fig. 5 mostra un esempio, in cui la configurazione della rotonda agisce come "scudo" per i binari LRT.

4. Progettazione sicura di rotatorie nelle reti LRT

Nei seguenti punti di questa sezione si spiegano i principali aspetti che dovrebbero essere considerati per la

arms apply to roundabouts with four arms (fig. 4). In this case, the black movements of the lower left part of the figure can be accommodated by a three-phase traffic light cycle. Again, the red movements in the lower right part of the figure can be transformed into perpendicular crossings of LRT tracks by the implementation of a roundabout.

3.3 Roundabouts with five arms, four arms in non-perpendicular direction, and other more complicated configurations

For every type of at-grade intersection where the incoming streets are not perpendicular, a roundabout can be a way of protecting the LRT tracks from crossings made in a non-per-

progettazione in sicurezza di una rotatoria LRT. In ogni caso, occorre tenere presente che il progetto è di solito fortemente influenzato da vincoli territoriali ed urbani.

4.1. Aspetti generali della progettazione LRT in sicurezza e la sua applicazione alle rotatorie

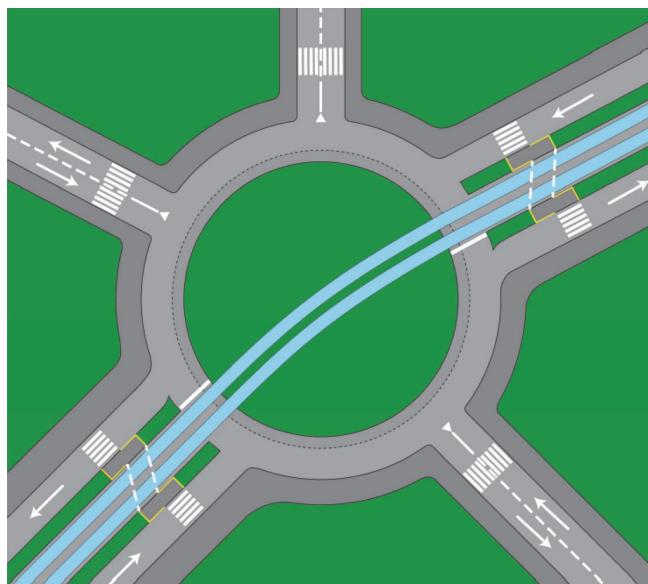
I tre principali aspetti progettuali generali per garantire un inserimento sicuro della LRT nel tessuto urbano sono: la visibilità tra la LRT e altri utenti della strada e la visibilità dei segnali e segnaletica; la percezione del sistema (e informazioni ad altri utenti della strada); e la protezione della LRT nella sua interazione con loro.

Questi tre aspetti, descritti più in dettaglio in [2], hanno la seguente applicazione alla progettazione della LRT durante l'attraversamento di una rotonda.

Per evitare problemi legati alla visibilità, occorre considerare i seguenti punti:

- l'attraversamento dei binari della strada anulare della rotonda dovrebbe essere il più vicino possibile ad un angolo retto per evitare punti ciechi. Le conseguenze di tale requisito per l'inserimento della LRT in una rotonda sono illustrate nella sezione 4.2;
- opportune distanze di visibilità, sia in avvicinamento alla rotatoria e nella rotatoria sono di grande importanza per il suo funzionamento sicuro. Occorre prestare particolare attenzione in modo che le apparecchiature stradali e l'arredo urbano (cartelli, guardrail, barriere di protezione, sistema catenaria aereo e lampioni, pali, impianti ecc.) non compromettano la visibilità. Per questo, a volte può essere necessario rimuovere o spostare alcuni ostacoli che in precedenza erano vicini alla zona in cui sono costruiti i nuovi binari LRT;
- inoltre, nessun elemento dovrebbe compromettere la visibilità della segnaletica stradale o segnali. Per questo, a volte può essere necessario: rimuovere o spostare alcuni ostacoli che in precedenza erano in prossimità della segnaletica stradale o dei segnali; modificare la posizione o l'orientamento della segnaletica stradale o dei segnali in luoghi chiaramente visibili nel campo visivo dell'utente della strada corrispondente; aumentare la dimensione consueta della segnaletica stradale o dei segnali in specifici luoghi problematici; utilizzare qualsiasi altra misura che migliora la visibilità della segnaletica e dei segnali;
- illuminazione sufficiente nelle intersezioni a raso deve essere fornita in modo da ridurre il rischio di incidenti durante la notte.

In relazione alla percezione e alle informazioni del sistema LRT, una rotonda con una LRT che la attraversa dovrebbe essere prontamente riconosciuta come tale dagli altri utenti della strada, sia quando ci si avvicina all'incrocio che quando lo si attraversa. Se la LRV ha la precedenza, ciò dovrebbe essere anche evidenziato nel progetto dell'intersezione. A questo scopo, i conducenti di veicoli stradali possono essere assistiti:



(Fonte - Source: [1])

Fig. 5 - Situazione in cui è consigliato l'utilizzo di una rotonda in un incrocio a cinque bracci.

Fig. 5 - Roundabout advisability in an intersection with five arms.

pendicular direction and the corresponding riskier maneuvers due to the lack of visibility. In this case, if the roundabout is properly designed (avoiding too many things to focus on at the same time), every crossing over the tracks will be made in a perpendicular direction, improving visibility and safety. An example is presented in fig. 5, where the roundabout configuration acts as a "shield" for the LRT tracks.

4. Safe design of roundabouts in LRT networks

The main aspects that should be considered to design a safe LRT roundabout are explained in the following points of this section. In any case, it has to be born in mind that the design is usually strongly influenced by territorial and urban constraints.

4.1 General aspects of safe LRT design and its application to roundabouts

The three main general design aspects to ensure a safe insertion of the LRT in the urban fabric are: the visibility between the LRT and other street-users and the visibility of signs and signals; the perception of the system (and information to other street-users); and the LRT protection in its interaction with them.

These three aspects, which are described in more detail in [2], have the following application to the design of the LRT when running through a roundabout.

For avoiding problems related to visibility, the following points need to be considered:

- evidenziando la zona LRT: ad esempio, con la marcatura della continuità dei binari usando una finitura con materiale, colore o conformazione differente rispetto alle aree circostanti fino al limite del percorso della fascia d'ingombro;
- segnaletica orizzontale e segnali: ad esempio, i segnali di pericolo LRT prima degli ingressi della rotatoria (segnali avanzati) e immediatamente prima degli attraversamenti dei binari LRT dell'anello stradale della rotatoria; e marcatura delle linee di arresto sulla carreggiata per il segnale di traffico prima degli attraversamenti dei binari LRT a una distanza minima di 1,5 m dalla fascia d'ingombro del veicolo, per creare una distanza di sicurezza tra veicoli stradali fermi e le LRV in movimento;
- tracciato di intersezione appropriato: ad esempio, rafforzando la percezione dell'isola centrale della rotatoria (contrassegnandola con un diverso colore, materiale, ecc.) e dell'anello stradale (colore, materiale).

Tutti questi elementi dovrebbero rendere evidente che tipo di comportamento è previsto dai conducenti di veicoli stradali. Inoltre, la progettazione dell'intersezione dovrebbe consistere di elementi facilmente riconoscibili al fine di rendere il tracciato e l'uso dell'intersezione semplice e facile da capire per i conducenti di veicoli stradali, specialmente coloro che non sono utenti regolari dell'incrocio. L'uso eccessivo di segnali dovrebbe essere evitato per evitare confusione.

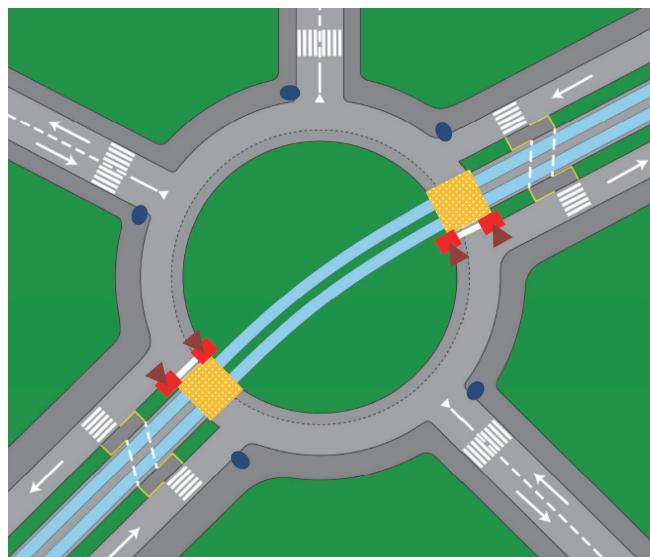
Infine, la protezione del sistema LRT in relazione alla progettazione della rotatoria potrebbe includere protezioni fisiche (cordoli, recinzioni, dissuasori) per evitare l'intrusione da parte di conducenti di veicoli stradali nei binari. Per lo stesso scopo, la superficie dei binari può essere resa inadatta per i veicoli stradali (ad es., finitura con erba, pavimentazione deterrente o massicciata). Inoltre, il provvedimento principale legato alla protezione nelle rotatorie è l'uso di segnali normativi e di semafori per i conducenti di veicoli stradali prima dell'attraversamento dei binari dell'anello stradale. Una considerazione importante per garantire la sicurezza riguarda l'evitare la violazione (intenzionale o non intenzionale) di questi semafori da parte dei conducenti di veicoli. La sezione 4.5 presenta una discussione sulle diverse misure per raggiungere tale obiettivo.

Come sintesi, la fig. 6 presenta le misure più comuni utilizzate per migliorare la sicurezza nelle rotatorie LRT, legate alla percezione e alla protezione.

4.2. Inserimento della LRT nella rotatoria

Oltre ai potenziali problemi con mancanza di visibilità, di percezione e di informazione, i problemi principali nelle rotatorie sono legati all'inserimento non appropriato della LRT nella rotatoria.

- *the crossing of the tracks by the circular road of the roundabout should be as close to a right angle as possible to avoid blind spots. The consequences of this requirement to the insertion of the LRT in a roundabout are explained in section 4.2.;*
- *appropriate sight distances, both while approaching the roundabout and being in it are of major importance for its safe operation. Special care must be taken so that road equipment and street furniture (signs, guard rails, crash barriers, overhead catenary system and utility poles, shelters, lamp, posts, planting, etc.) do not impair visibility. For this, it can sometimes be necessary to remove or move certain obstacles which were previously near the zone where the new LRT tracks are built;*
- *additionally, no element should impair the visibility of traffic signs or signals. For this, it can sometimes be necessary: to remove or move certain obstacles which were previously near the traffic signs or signals; to change the location or orientation of traffic signs or sig-*



Legenda – Legend:

- | | |
|--|--|
| | Finitura dei binari con materiale, colore o conformazione differente rispetto alle zone circostanti.
Finishing of the tracks with different material, color or texture than the surrounding areas. |
| | Marcatura delle linee di arresto prima degli attraversamenti dei binari LRT.
Marking stop lines before the crossings of the LRT tracks. |
| | Semafori prima dell'attraversamento dei binari da parte della strada anulare.
Traffic lights before the crossing of the tracks by the circular road. |
| | Segnali di avviso LRT prima degli attraversamenti dei binari LRT da parte della strada anulare (sul palo del semaforo).
LRT warning signs before the crossings of the LRT tracks by the circular road (on the pole of the traffic light). |
| | Segnali di avviso LRT prima delle entrate delle rotatorie (segnali avanzati).
LRT warning signs before the entrances of the roundabout (advanced signs). |

(Fonte - Source: [17])

Fig. 6 - Misure più comuni per migliorare la sicurezza nelle rotatorie LRT, relative alla percezione e alla protezione.
Fig. 6 - Most common measures to improve safety in LRT roundabouts, related to perception and protection.

Se la LRT attraversa la rotatoria decentrata, o le entrate della strada nella rotatoria sono troppo vicine ai binari, potrebbe essere necessario deviare l'attenzione dei conducenti stradali in due direzioni diverse. Ciò significa che i conducenti di veicoli stradali devono concentrarsi sui veicoli provenienti da sinistra nella corsia interna della rotatoria, ma devono spostare immediatamente la loro attenzione al semaforo che protegge l'attraversamento dei binari della LRT (e alle LRV provenienti o da destra o da sinistra). Pertanto, occorre prestare particolare attenzione per evitare un ingresso di carreggiata nella rotatoria troppo vicino all'attraversamento dei binari della LRT. Degli esempi di situazione che bisogna evitare sono illustrati nelle figure 7a, 7b e 7c.

Inoltre, come indicato nella sezione 4.1, per garantire visibilità tramite l'inserimento della LRT nella rotonda, l'incrocio dei binari da parte della rotonda dovrebbe essere il più vicino possibile ad un angolo retto. Si vedano buone e cattive soluzioni d'inserimento riguardanti questo aspetto nelle figure 7d a 7g.

4.3. Dimensione della rotonda e numero di corsie

Un'importante considerazione di carattere generale da tenere in mente per la progettazione sicura delle intersezioni a raso e rotatorie nelle reti LRT è che la geometria dell'intersezione deve essere adeguata al volume di traffico.

Nel caso delle rotatorie, questo significa che il raggio dell'isola centrale, il numero e la larghezza delle corsie nell'anello stradale, così come la distanza tra le strade che entrano nella rotatoria e i punti di attraversamento LRT, devono essere attentamente progettate (o ridisegnate in conformità alle nuove circostanze quando si inserisce la LRT in una rotonda esistente).

Tuttavia, la dimensione è normalmente legata al numero di corsie, e maggiore è il numero delle corsie più aumenta il numero di possibili conflitti ed un maggior numero di corsie è anche indicativo di maggiori volumi di traffico. Inoltre, la velocità del veicolo aumenta in proporzione alle dimensioni di una rotatoria. Di conseguenza, maggiori sono le dimensioni di una rotatoria, più alto è il potenziale degli scontri. Inoltre, con più corsie possono insorgere problemi di visibilità a causa dell'oscuramento da parte di un veicolo stradale ad un altro veicolo. La fig. 8 illustra, per il caso francese, il rapporto di incidenti in base alla dimensione della rotonda. La linea blu con la scala sulla destra mostra il numero di incidenti che si verificano in media per ogni tipo di rotatoria (considerando le sue dimensioni). Le barre rosso granata mostrano il numero di rotatorie di ogni dimensione esistenti nelle reti LRT francesi.

Lo studio francese sugli incidenti delle rotonde LRT [15] conclude che l'uso di due o più corsie per il traffico stradale nelle strade che entrano nella rotonda (anziché solo una corsia) sembra essere uno dei principali fattori

nals to places that are clearly visible in the field of vision of the corresponding street user; to increase the usual size of the signs or signals in specific troublesome locations; or to use any other measure that enhances the visibility of the signs and signals;

- sufficient lighting of at-grade intersections must be provided in order to reduce crash risk at night.*

In relation to perception and information of the LRT system, a roundabout that has an LRT traversing it should be readily recognized as such by other road users, both when approaching the intersection and when traversing it. If the LRV has priority, this should also be highlighted in the design of the intersection. For this purpose, road vehicle drivers can be assisted by:

- highlighting the LRT zone: for example, marking the continuity of the tracks by finishing them with different material, color or texture than the surrounding areas until the limit of the swept path;*
- road markings and signs: for example, LRT warning signs before the entrances of the roundabout (advanced signs) and immediately before the crossings of the LRT tracks by the circular road of the roundabout; and marking stop lines on the carriageway for the traffic signal before the crossings of the LRT tracks at a minimum distance of 1.5 m from the swept path of the vehicle, to create a safe distance between stopped road vehicles and LRVs in motion.*
- appropriate intersection layout: for example, strengthening the perception of the roundabout central island (by marking it with a different color, material, etc.) and of the circular road (color, material).*

All these elements should make it obvious what sort of behavior is expected from road vehicle drivers. Additionally, the design of the intersection should consist of easily recognizable elements in order to make the layout and the use of the intersection simple and easy to understand for road vehicle drivers, particularly those who are not regular users of the intersection. The excessive use of signs should be avoided to prevent confusion.

Finally, the protection of the LRT system in relation to roundabout design may include physical protectors (curbs, fences, bollards) for avoiding intrusion of the tracks by road vehicle drivers. For the same purpose, the surface of the tracks can be made unsuitable for road vehicles (e.g., finishing it with grass, deterrent paving or ballast). In addition, the main measure related to protection in roundabouts is the use of prescriptive signs and traffic lights for road vehicle drivers before the crossing of the tracks by the circular road. An important consideration for guaranteeing safety is related to the avoidance of the infringement (either intentional or unintentional) of these traffic lights by road vehicles drivers. A discussion about several measures for achieving this objective is presented in section 4.5.

As summary, fig. 6 presents the most common measures used to improve safety in LRT roundabouts, related to perception and protection.

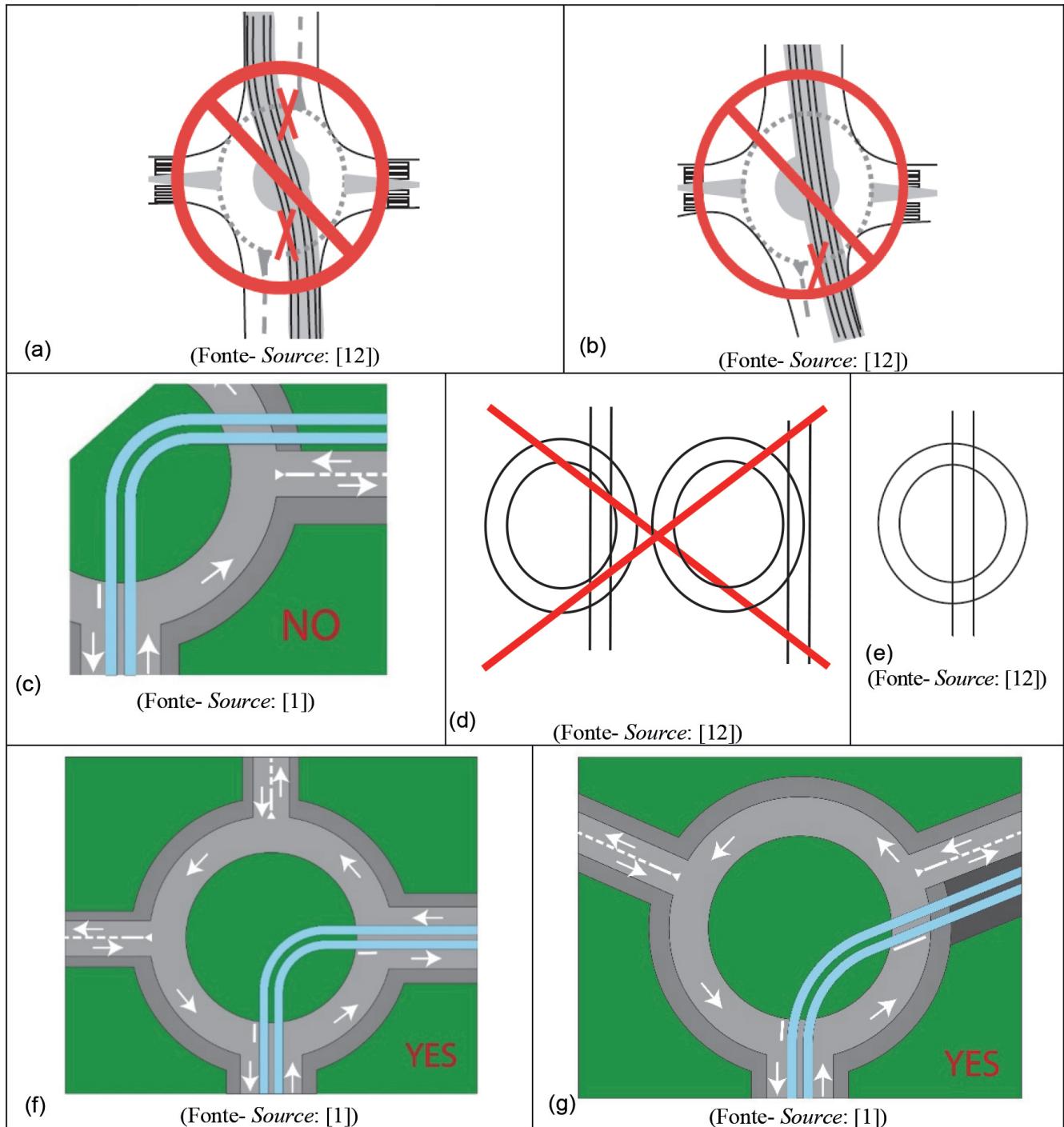


Fig. 7 - Buoni e cattivi esempi di inserimento della LRT nella rotatoria: a, b & c) Configurazioni non consigliabili con ingressi di carreggiata fino alla rotatoria troppo vicini all'incrocio dei binari; d) Configurazioni non consigliabili relative all'angolo dell'incrocio tra la rotatoria e i binari LRT; e, f & g) Configurazioni consigliabili relative all'angolo dell'incrocio tra la rotatoria e i binari LRT.

Fig. 7 - Good and bad examples of LRT insertion in the roundabout: a, b & c) Not-advisable configurations with roadway entrances to the roundabout too close to the tracks crossing; d) Not-advisable configurations related to the angle of the intersection between the circular road and the LRT tracks; e, f & g) Advisable configurations related to the angle of the intersection between the circular road and the LRT tracks.

di rischio per le rotatorie LRT. Pertanto, il testo delle linee guida francesi è come segue [12]:

- Le entrate non parallele alla LRT con più di una corsia conducono a difficoltà sulla percezione della zona LRT e pertanto a situazioni pericolose; inoltre, portano ad un aumento del raggio di strada per le stesse dimensioni della rotatoria, che induce a velocità più elevate. Pertanto, le entrate non parallele alla LRT con più di una corsia sono vietate e possono essere utilizzate solo in casi eccezionali.
- Le entrate parallele alla LRT possono essere dotate di due corsie solo se il volume di traffico stradale giustifica questa decisione e il traffico pedonale (volume e natura) lo consente.
- Le entrate con solo una corsia sono la soluzione generale. Hanno una larghezza che va da 3,00 a 3,50 m.
- Le uscite con più di una corsia sono una fonte di pericolo per gli attraversamenti pedonali, pertanto in genere sono sconsigliate e dovrebbero essere riservate solo per casi eccezionali.
- Le uscite con una sola corsia sono la regola generale. Hanno una larghezza che va da 3,50 e 4,00 m.

Tuttavia, è importante che la capacità dell'intersezione sia adattata alla capacità delle vie adiacenti e alla capacità mirata complessiva della rete. Se vi è una sola corsia per entrare ed uscire da una rotatoria con un alto volume di traffico, la congestione generata può favorire la mancanza di rispetto dei semafori da parte dei conducenti di veicoli stradali, e quindi condurre a situazioni più pericolose.

4.4. Ulteriori aspetti specifici legati alla progettazione in sicurezza delle rotatorie LRT

In qualsiasi rotatoria LRT (e quindi, in uno qualunque dei casi presentati nelle sezioni da 3.1 a 3.3), la zona di arresto prima della LRT nella rotatoria deve essere attentamente progettata per consentire ad un veicolo stradale di aspettare per attraversare i binari senza bloccare l'uscita della rotatoria agli altri veicoli (fig. 9). Inoltre, gli attraversamenti pedonali dovrebbero trovarsi su ogni ramo ad una distanza tale che le automobili non abbiano ancora raggiunto velocità elevate, ma che abbiano già lasciato l'anello stradale e che siano focalizzate sulla strada di uscita e sui pedoni. Tale distanza nelle linee guida francesi è di 3 metri [12].

A volte viene utilizzato un tracciato di rotatoria allungato nella direzione perpendicolare ai binari LRT. Questo può avere alcuni vantaggi e svantaggi:

- vi è uno spazio più lungo per contenere i veicoli stradali. Questo è

4.2. Insertion of the LRT in the roundabout

Besides potential problems with lack of visibility, perception and information, the main problems in roundabouts are related to unsuitable insertion of the LRT in the roundabout.

If the LRT crosses the roundabout off-centered, or the road entrances to the roundabout are too close to the tracks, the road drivers' attention may need to be diverted in two different directions. This means that road vehicle drivers have to focus on the road vehicles coming from the left in the circular road of the roundabout, but they have to immediately change their attention to the traffic lights which protect the crossing over the LRT tracks (and to the LRVs coming either from the right or from the left). Therefore, special care needs to be taken to avoid a roadway entrance to the roundabout too close to the crossing of the LRT tracks. Examples of these situations, which need to be avoided, are presented in figs 7a, 7b and 7c.

Additionally, as stated in section 4.1, to ensure visibility by the insertion of the LRT in the roundabout, the crossing of the tracks by the circular road should be as close to a right angle as possible. See bad and good insertion solutions related to this aspect in figs 7d to 7g.

4.3. Roundabout size and number of lanes

An important general consideration to be born in mind for the safe design of at-grade intersections and roundabouts in LRT networks is that the geometry of the intersection must be appropriate to the traffic volume.

For the case of roundabouts, this means that the radius of the central island, the number and width of the lanes in the circular road, as well as the distance between the roads entering the roundabout and the LRT crossing points, must be carefully designed (or redesigned in accordance to new circumstances when the LRT is being inserted into an existing roundabout).

Nevertheless, size is normally linked to the number of lanes, and more lanes increase the number of possible con-

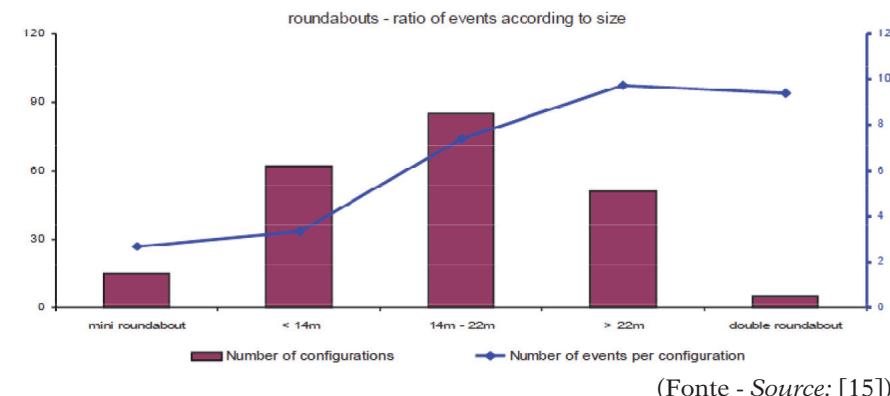
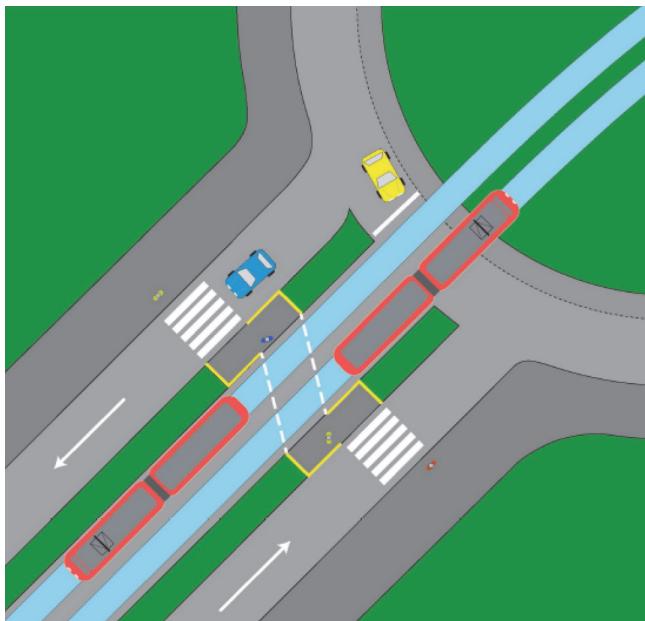


Fig. 8 - Rapporto incidente per dimensione rotonda.

Fig. 8 - Accident ratio by roundabout size.



(Fonte - Source: [1])

Fig. 9 - Zona di arresto e posizione dell'attraversamento pedonale nelle uscite delle rotonde.

Fig. 9 - Stopping zone and pedestrian crossing position in roundabout exits.

importante se il volume di traffico è elevato, poiché i veicoli stradali devono fermarsi prima dei binari LRT quando la LRV si avvicina, finché non viene sgomberato l'incrocio;

- vi è un tratto perpendicolare più lungo prima dell'attraversamento dei binari LRT, che migliora la visibilità (e con essa, la sicurezza) all'interno dell'incrocio;
- si possono evitare intrusioni nella zona LRT separandola nettamente dalla carreggiata adiacente con elementi rigidi;
- d'altra parte, questa soluzione può aumentare la velocità dei veicoli stradali nella rotonda, specialmente dove attraversa la zona LRT, riducendo la sicurezza.

4.5. Miglioramenti in termini di sicurezza per le rotonde LRT tramite misure applicate ai semafori

Come indicato nella sezione 2, il consueto modo di gestire una rotonda LRT è tramite semafori per i conducenti di veicoli stradali situati immediatamente prima dell'attraversamento dei binari LRT da parte dell'anello stradale. Questi semafori diventano rossi ogni volta che una LRV è presente o in avvicinamento, dando la precedenza alla LRV.

In generale, non è necessario aggiungere semafori complementari sulle strade che entrano nella rotonda, ma la rotonda deve essere facilmente riconosciuta come una con binari LRT che la attraversano (come indicato

flicts and are also indicative of higher traffic volumes. Furthermore, vehicle speed rises with the size of a roundabout. Therefore, the larger the size of a roundabout, the higher the potential for crashes. Additionally, having several lanes can introduce visibility problems due to one road vehicle obscuring another. In fig. 8, the accident ratio by roundabout size is presented for the French case. The blue line with the scale on the right shows the number of crashes that happen on average for each kind of roundabout (considering its size). The maroon bars show the number of roundabouts of each size existing in the French LRT networks.

The French study about LRT roundabout accidents [15] concludes that the use of two or more lanes for road traffic in the roads entering the roundabout (instead of only one lane) seems to be one of the main risk factors for LRT roundabouts. Therefore, the French guidelines text is as follows [12]:

- The entrances non-parallel to the LRT with more than one lane lead to difficulties on the perception of the LRT zone and thus unsafe situations; moreover, they lead to an increase of road radius for the same size of the roundabout, which induces higher speeds. Therefore, non-parallel to LRT entrances with more than one lane are forbidden and may only be used in exceptional cases.
- The entrances parallel to the LRT can be provided with two lanes only if the road traffic volume justifies this decision and the pedestrian traffic (volume and nature) allows it.
- Entrances with only one lane are the general solution. They have a width ranging from 3.00 to 3.50 m.
- Exits with more than one lane are a source of unsafety for pedestrian crossings, therefore they are generally not recommended and they should be reserved only for exceptional cases.
- One-lane exits are the general rule. They have a width between 3.50 and 4.00 m.

Nevertheless, it is important that the capacity of the intersection be adjusted to the capacity of adjoining streets and to the targeted overall capacity of the network. If only one lane is provided for entering and exiting a roundabout with a high traffic volume, the congestion generated can foster the disrespect of traffic lights by road vehicle drivers, leading to situations that are more dangerous.

4.4. Additional specific aspects related to LRT roundabouts safe design

In any LRT roundabout (and therefore, in any of the cases presented in sections 3.1 to 3.3), the stopping zone before the LRT in the roundabout should be carefully designed to allow a road vehicle to wait for crossing the tracks without blocking the exit of the roundabout to other vehicles (fig. 9). Additionally, pedestrian crossings should be located on each branch at a distance where cars have not yet accelerated to high speeds, but have already left the

nel paragrafo 4.1). Tuttavia, a volte si possono installare semafori anche nelle strade di accesso alla rotonda, soprattutto quando l'entrata è molto vicina all'attraversamento dei binari LRT, quando il volume di traffico stradale è elevato, o quando la rotonda ha dimostrato di essere un punto rischioso e non vi sono altre misure efficaci. In quest'ultimo caso, una soluzione per eliminare il rischio potrebbe essere quella di installare i semafori ad ogni entrata della rotonda e modificare la situazione di "tutto rosso" ogni volta che la LRV è presente o in avvicinamento, vietando l'accesso alla rotonda per i veicoli stradali fino a quando la rotonda è stata sgomberata dalle LRV. Questa soluzione non può essere utilizzata in modo generale, in quanto può portare alla saturazione dell'intersezione a raso se il volume di traffico è molto elevato e/o la frequenza della LRT è elevata, poiché la capacità diminuisce con questo tipo di regolazione del semaforo.

In ogni caso, una considerazione importante per garantire la sicurezza nelle rotatorie LRT con semaforo (ovunque si trovino) è di evitare la violazione, intenzionale o meno, di questi semafori da parte dei conducenti di veicoli stradali. Ci sono diverse misure di potenziamento semaforico che possono essere applicate per cercare di evitare l'infrazione involontaria in luoghi particolarmente complicati, per esempio:

- l'allargamento del diametro della luce rossa (ad esempio, modificando da 200 mm a 300 mm), l'uso di luci più luminose (per esempio, LED) o l'uso di un tabellone sul semaforo;
- la duplicazione di semafori compresi quelli nuovi più bassi in linea di vista dei conducenti;
- installazione marker stradali lampeggianti incorporati nella pavimentazione all'altezza della linea di arresto, sincronizzati con il semaforo rosso (vi è una discussione circa l'efficacia di questa soluzione a Houston, Texas, in [18]);
- l'inserimento/l'aggiunta nel palo del semaforo di un simbolo LRV attivo che inizia a lampeggiare quando la LRV è in avvicinamento, alcuni secondi prima che la luce del semaforo diventi rossa;
- far rispettare il semaforo fisicamente con delle barriere stradali (con strisce bianche e rosse) collegate con il messaggio semaforico e la presenza della LRV. Questa misura non è adatta per le aree urbane centrali e dovrebbe essere considerata solo in casi particolari.

Nel caso di violazioni intenzionali, una misura che può essere applicata è l'uso di telecamere a infrarossi, che multano automaticamente i conducenti che non rispettano un semaforo rosso. Questa soluzione è applicata alle LRT di Los Angeles [4].

Diversi esempi di applicazione di questo tipo di misure sono riportati in [1, 16].

circular road and are focused on the exiting road and pedestrians. The French guidelines for this distance is 3 meters [12].

A roundabout layout which is enlarged in the perpendicular direction to the LRT tracks is sometimes used. This can have some advantages and disadvantages:

- *a longer space is provided for road vehicles storage. This is important if the traffic volume is high, as road vehicles must stop before the LRT tracks when the LRV is approaching, until the intersection is cleared;*
- *a longer perpendicular stretch is provided before the LRT tracks crossing, which improves visibility (and with it, safety) in the crossing;*
- *intrusions in the LRT zone can be avoided by clearly separating it from the adjacent carriageway by rigid elements;*
- *on the other hand, this solution may increase the speed of road vehicles on the roundabout, particularly where crossing the LRT zone, reducing safety.*

4.5. Safety improvements for LRT roundabouts by measures applied to traffic lights

As stated in section 2, the usual way of managing an LRT roundabout is with traffic lights for road vehicle drivers located immediately before the crossings of the LRT tracks by the circular road. These traffic lights will change to red every time that an LRV is present or approaching, giving the priority to the LRV.

In general, it is not necessary to include complementary traffic lights on the streets that enter the roundabout, but the roundabout has to be readily recognized as one with LRT tracks traversing it (as stated in section 4.1). Nevertheless, sometimes traffic lights can be installed also at the road entrances to the roundabout, especially when the entrance is very close to the crossing of the LRT tracks, when the road traffic volume is high, or when the roundabout has proved to be a risky point and no other measures are effective. In this last case, one solution to avoid risk could be to implement traffic lights at each entrance to the roundabout, and to change to an "all red" situation every time that the LRV is present or approaching, forbidding the access to the roundabout for road vehicles until the roundabout has been cleared of LRVs. This solution cannot be used in a general way, as it can lead to the saturation of the at-grade intersection if the traffic volume is very high and/or the frequency of the LRT is high, as the capacity diminishes with this kind of traffic light regulation.

In any case, an important consideration to ensure safety in LRT roundabouts with traffic lights (wherever they are located) is avoiding the infringement of these traffic lights, either intentional or unintentional, by road vehicles drivers. There are several measures of traffic light reinforcement that can be applied to try to avoid the unintentional infringement in places that are specially complicated, for example:

- *enlargement of the diameter of the red light (e.g., chang-*

5. Esempi di casi reali di misure volte a migliorare la sicurezza delle rotatorie LRT

Nel corso dell’Azione COST TU1103, è stato inviato un questionario a diverse agenzie LRT in cui si chiedeva di identificare le loro principali aree sensibili ed ex aree sensibili. Un totale di 24 agenzie LRT ha partecipato al questionario, da 13 Paesi diversi: Austria (Vienna); Belgio (Bruxelles); Repubblica Ceca (Brno, Praga, Olomouc); Francia (Le Mans, Lione, Montpellier); Germania (Berlino, Brema); Irlanda (Dublino); Israele (Gerusalemme); Italia (Milano); Olanda (Amsterdam); Portogallo (Lisbona, Porto); Spagna (Barcellona, Bilbao, Tenerife); Svizzera (Berna, Ginevra, Zurigo); e Regno Unito (Manchester, Sheffield).

La definizione data per le aree sensibili è quella spiegata nella parte introduttiva. Le ex aree sensibili sono luoghi che in passato erano aree sensibili, ma ora sono luoghi più sicuri grazie alle misure messe in atto per migliorare la situazione.

In questa sezione, si presentano alcune delle rotatorie LRT che erano state identificate come ex aree sensibili nei questionari, spiegando le misure messe in atto per migliorare la situazione. Sono incluse le cifre circa il numero di incidenti per anno prima e dopo l’attuazione delle misure, in modo da cercare di sostenerne l’efficacia.

5.1. Rotonda Paul Cézanne, Le Mans (Francia)

La LRT di Le Mans è stata inaugurata nel novembre 2007. La LRT attraversa il centro della rotonda Paul Cézanne e si sono verificati diversi incidenti con veicoli stradali che non hanno rispettato i semafori (e la precedenza della LRV), così come le cadute dei passeggeri a causa della frenata di emergenza in conseguenza di ciò.

Le misure applicate per affrontare questo problema sono state le seguenti (figg. 10a,b&c):

- migliorare la percezione utilizzando segni con “denti di squalo” nei punti in cui l’anello stradale della rotonda attraversa i binari LRT, implementati nel mese di settembre 2010;
- migliorare la protezione mediante l’impianto di un secondo semaforo R24, lampeggiante alternativamente con quello esistente (flip-flop), installato nel maggio 2012.

L’evoluzione del numero di incidenti (incidenti e cadute dei passeggeri) in questo punto è la seguente: novembre 2007 fino alla fine del 2008: 7; anno 2009: 2; anno 2010: 0; anno 2011: 1; anno 2012: 2; anno 2013: 0. La forte riduzione dopo l’inizio del funzionamento è abbastanza comune, dopo la realizzazione di nuove reti LRT, poiché gli altri utenti della strada hanno bisogno di un tempo di apprendimento per sapere come interagire con il nuovo sistema. In ogni caso, sembra che ci sia stato un

ing from 200 mm to 300 mm), use of brighter lights (e.g., LED) or use of a backboard on the traffic light;

- duplication of traffic lights including new lower ones in the drivers’ line of sight;
- installation of flashing road studs embedded in the pavement on the stop line, synchronized with red traffic signal (a discussion about the effectiveness of this solution in Houston, Texas, is made in [18]);
- including in the traffic light pole an active LRV symbol which starts blinking when the LRV is approaching, a few seconds before the traffic light changes to red;
- enforcing traffic light physically with traffic barriers (with red and white stripes) connected with the traffic lights message and the LRV presence. This measure is not suitable for central urban areas and should only be considered in special cases.

For the case of intentional violations, one measure that can be applied is the use of red-light cameras, which automatically fine drivers who do not respect a red traffic light. This solution is applied in Los Angeles LRT [4].

Several examples of application of this kind of measures are shown in [1, 16].

5. Real case examples of measures to improve LRT roundabouts safety

During the COST Action TU1103, a questionnaire was sent to several LRT agencies where they were asked to identify their main hotspots and former hotspots. A total of 24 LRT agencies participated in the questionnaire, from 13 different countries: Austria (Vienna); Belgium (Brussels); Czech Republic (Brno, Prague, Olomouc); France (Le Mans, Lyon, Montpellier); Germany (Berlin, Bremen); Ireland (Dublin); Israel (Jerusalem); Italy (Milan); Netherlands (Amsterdam); Portugal (Lisbon, Porto); Spain (Barcelona, Bilbao, Tenerife); Switzerland (Bern, Geneva, Zürich); and United Kingdom (Manchester, Sheffield).

The definition given for hotspots in the one explained in the Introduction. Former hotspots are locations that used to be hotspots in the past, but are now safer places due to the measures implemented to improve the situation.

In this section, some of the LRT roundabouts that were identified as former hotspots in the questionnaires are presented, explaining the measures applied to improve the situation. Figures about number of crashes by year before and after the implementation of the measures are included, in order to try to endorse their effectiveness.

5.1. Paul Cézanne roundabout, Le Mans (France)

Le Mans LRT was inaugurated in November 2007. The LRT runs through the center of Paul Cézanne roundabout and several crashes occurred with road vehicles that did not respect traffic lights (and LRVs priority), as well as passengers’ falls due to emergency braking as a consequence of that.

leggero miglioramento a causa delle misure attuate, anche se i dati non sono conclusivi.

5.2. Rotonda São Brás, Porto (Portogallo)

Ancora una volta, in questo caso, la nuova linea LRT attraversa il centro della rotonda di São Brás, e sono accaduti diversi incidenti a causa del mancato rispetto del semaforo rosso da parte dei conducenti di veicoli stradali (4 incidenti in un anno).

Le misure attuate per migliorare la situazione sono state, in questo caso (figg. 10d, e & f):

- migliorare la visibilità dei semafori spostando alcuni segnali che creavano confusione e aumentando il diametro dei semafori per ottenere una migliore consapevolezza da parte dei conducenti di veicoli stradali;
- migliorare la percezione dipingendo nuove linee di arresto sulla pavimentazione.

5.3. Rotonda Cruz de Piedra, Tenerife (Spain)

La prima linea LRT di Tenerife è stata inaugurata a giugno 2007. Cruz de Piedra è un'altra rotatoria attraversata al centro dai binari LRT. In questo caso, come illustrato nella fig. 10g, due delle entrate stradali nella rotatoria sono molto vicine ai punti in cui l'anello stradale attraversa i binari LRT. Questo porta ad una situazione complicata (spiegata nella sezione 4.2), poiché l'attenzione dei conducenti deve essere rivolta in due direzioni diverse: devono concentrarsi sui veicoli stradali provenienti da sinistra nell'anello stradale, ma devono subito spostare la loro attenzione verso il semaforo che protegge l'attraversamento dei binari LRT (ed alle LRV provenienti o da destra o da sinistra).

Si sono verificati diversi incidenti per il mancato rispetto del semaforo rosso da parte dei conducenti di veicoli stradali. Le misure messe in atto (nel novembre 2007), si sono concentrate sul miglioramento della protezione, come segue (figg. 10i e 10j):

- il raddoppio dei semafori sul bordo dei binari LRT: la dotazione di un nuovo piccolo semaforo doppio nella parte inferiore dei semafori esistenti (ad altezza occhi del conducente), per aumentare la consapevolezza dei conducenti di veicoli stradali che arrivano all'incrocio;
- sono stati installati dei nuovi semafori in prossimità delle entrate della rotatoria vicine all'attraversamento dei binari LRT.

Inoltre, è stata effettuata una campagna di sicurezza stradale mediante la distribuzione di volantini ai conducenti di veicoli stradali, rammentando loro le regole per la sicurezza stradale (fig. 10h). È stato sponsorizzato anche un programma televisivo sulla sicurezza stradale.

The measures applied to deal with this problem were the following (figs 10a,b&c):

- *improving perception by using "shark teeth" marks in the points where the roundabout's ringroad crosses the LRT tracks, implemented in September 2010;*
- *improving protection by implanting a second R24 traffic light, blinking alternatively with the existing one (flip-flop), implanted in May 2012.*

The evolution of the number of incidents (crashes and passengers' falls) in this point is the following: November 2007 to end of 2008: 7; year 2009: 2; year 2010: 0; year 2011: 1; year 2012: 2; year 2013: 0. The sharp reduction after the beginning of operation is quite common after the implementation of new LRT networks, as the other street-users need a learning time to know how to interact with the new system. In any case, it seems that there has been a slight improvement due to the measures implemented, although data are not conclusive.

5.2. São Brás roundabout, Porto (Portugal)

Again, in this case, the new LRT line runs through the center of the São Brás roundabout, and several crashes happened due to disrespect of red traffic lights by road vehicle drivers (4 crashes in one year).

The measures applied to improve the situation were, in this case (figs 10d,e&f):

- *improving visibility of traffic lights by relocation of some signs that were causing confusion, and by increasing the diameter of traffic lights to get better awareness by road vehicle drivers;*
- *improving perception by painting new stopping lines on the pavement.*

5.3. Cruz de Piedra roundabout, Tenerife (Spain)

The first line of Tenerife LRT was inaugurated in June 2007. Cruz de Piedra is another roundabout with the LRT tracks running through its centre. In this case, as it is shown in fig. 10g, two of the road entrances to the roundabout are very close to the points where the ringroad crosses the LRT tracks. This leads to a complicated situation (explained in section 4.2), as the road drivers' attention need to be diverted in two different directions: they have to focus on the road vehicles coming from the left in the ringroad, but immediately change their attention to the traffic lights which protect the crossing over the LRT tracks (and to the LRVs coming either from the right or from the left).

Several crashes took place due to disrespect of red traffic lights by road vehicle drivers. The measures applied (in November 2007) were focused on improving protection, as follows (figs 10i and 10j):

- *duplication of traffic lights on the edge of the LRT tracks: a new double small traffic light is provided in the lower part of existing traffic lights (at drivers' eyes*

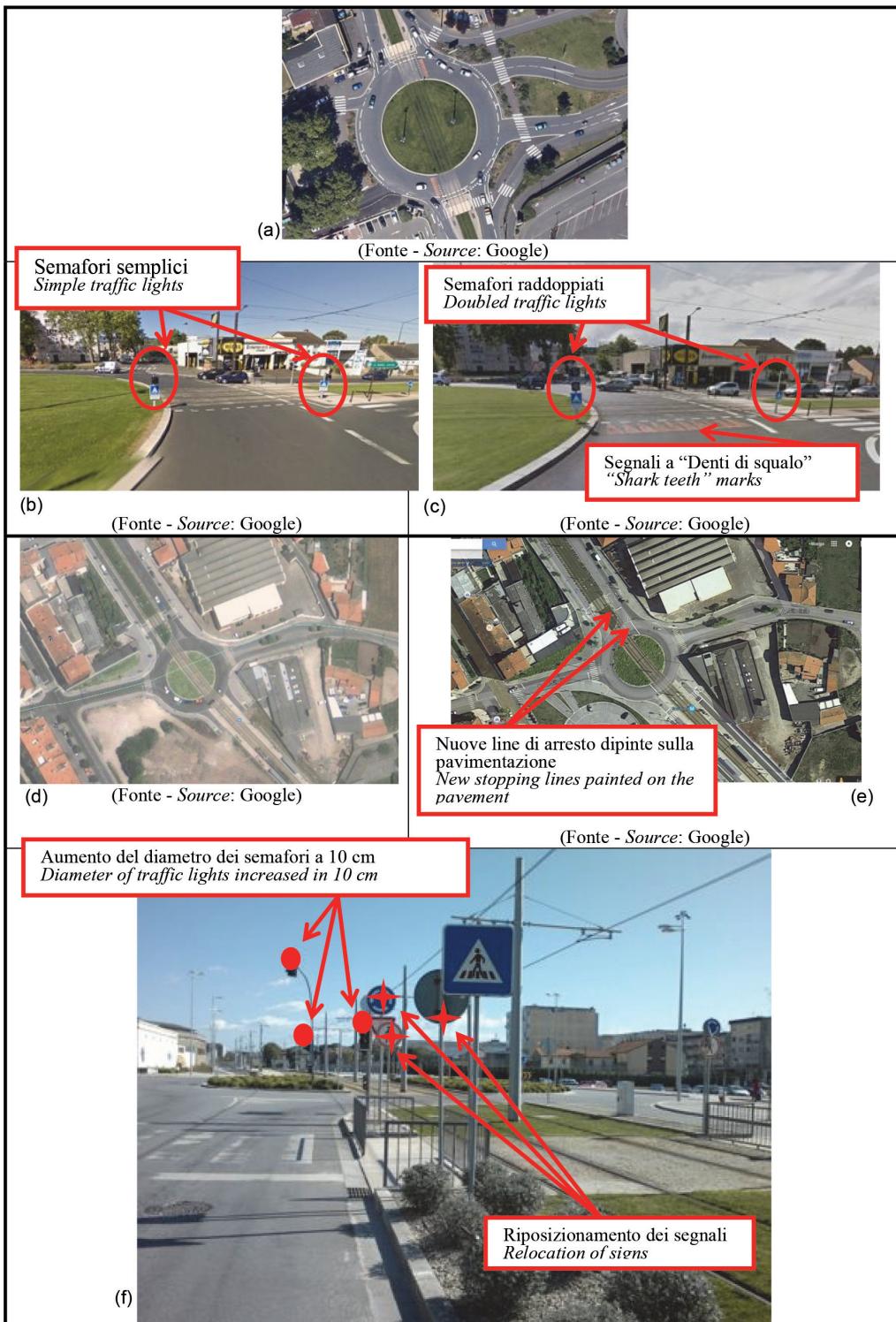
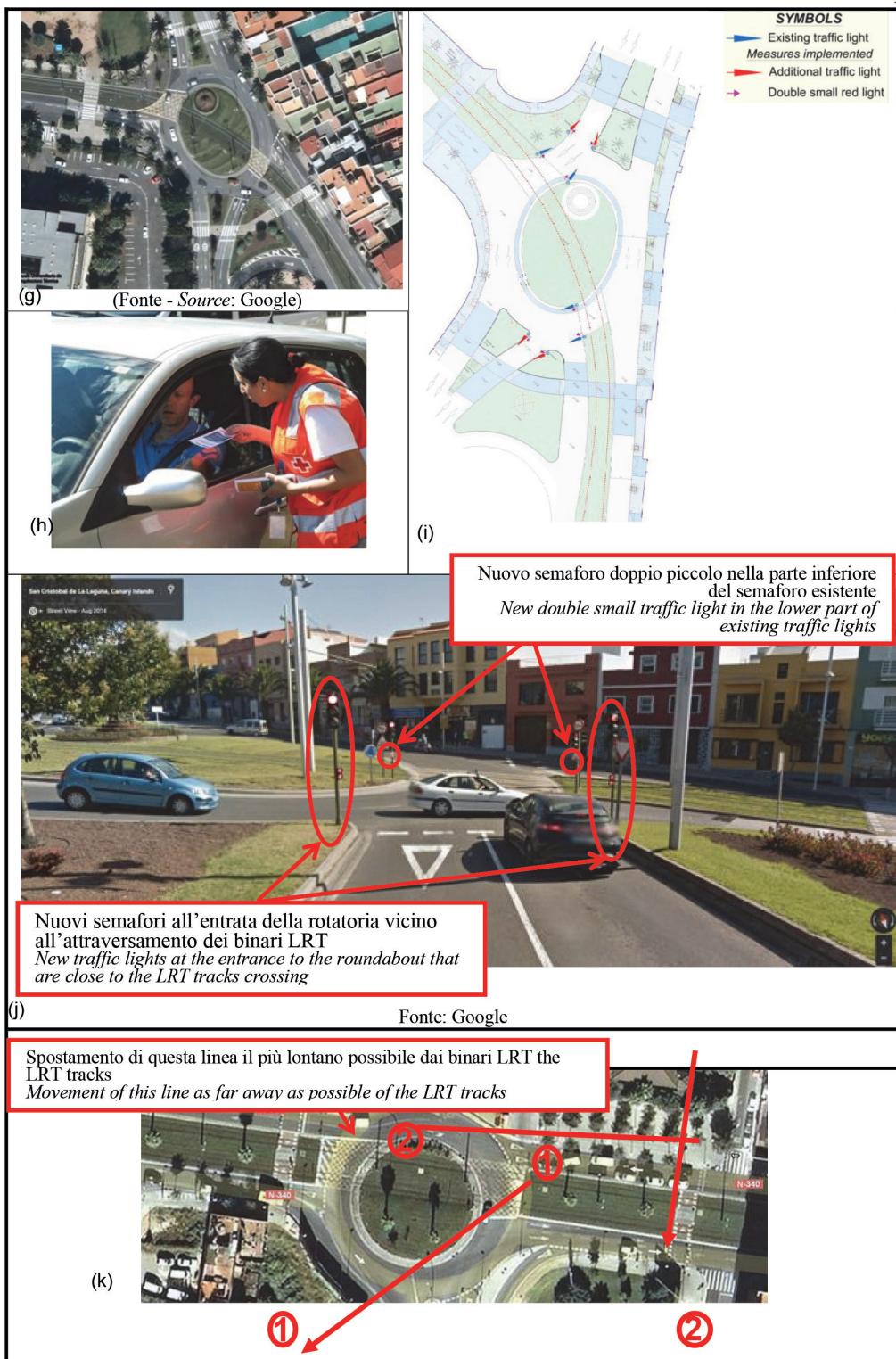


Fig. 10 - Rotatorie: a, b & c) Rotonda Paul Cézanne ex area sensibile: a) Tracciato della rotatoria; b) Condizione precedente; c) Condizione successiva. - d, e & f) Rotonda São Brás ex area sensibile: d) Condizione iniziale della rotatoria; e) Condizione attuale della rotonda con nuove linee di arresto dipinte sulla pavimentazione; f) Misure applicate all'ingresso della rotonda.

Fig. 10 - Roundabouts: a,b&c) Paul Cézanne roundabout former hotspot: a) Layout of the roundabout; b) Before condition; c) After condition.- d,e&f) São Brás roundabout former hotspot: d) Initial condition of the roundabout; e) Current condition of the roundabout with new stopping lines painted on the pavement; f) Measures applied in the roundabout entrance.

(...)



(segue... - follows...)

Fig. 10 - Rotatorie: g, h, i & j) Rotonda Cruz de Piedra ex area sensibile: g) Tracciato della rotonda; h) Campagna di sicurezza stradale; i) Schizzo delle misure applicate (semafori); j) Foto delle misure messe in atto (semafori). -k, l & m) Rotonda Reial Road - Baix Llobregat Av. ex area sensibile: k) Tracciato della rotonda.

Fig. 10 - Roundabouts: g,h,i&j) Cruz de Piedra roundabout former hotspot:g) Roundabout layout; h) Road safety campaign; i) Sketch of the measures applied (traffic lights); j) Photo of the measures applied (traffic lights). - k,l&m) Reial Road - Baix Llobregat Av. roundabout former hotspot: k) Roundabout layout

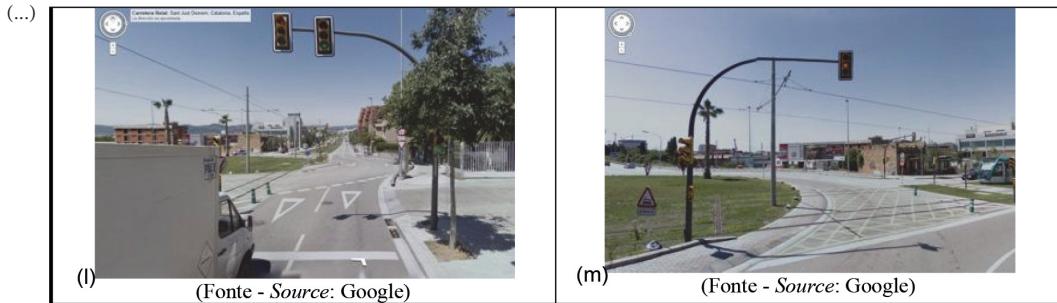


Fig. 10 - Rotatorie: l & m): Rotonda Reial Road - Baix Llobregat Av. ex area sensibile: l) Riposizionamento della linea di arresto; m) Situazione semafori.

Fig. 10 - Roundabouts: l&m): Reial Road - Baix Lobregat Av. roundabout former hotspot: l) Stopping line relocation; m) Traffic lights situation.

L'evoluzione del numero di incidenti e del numero delle frenate di emergenza (tra parentesi) in questo luogo è la seguente: da giugno a fine 2007: 9 (64); anno 2008: 7 (24); 2009: 4 (29); 2010: 2 (14); 2011: 1 (9); 2012: 0 (11); 2013: 3 (12). Anche in questo caso la riduzione può essere dovuta al tempo di apprendimento degli altri utenti della strada, menzionato prima. In ogni caso, sembra che ci sia stato un leggero miglioramento a causa delle misure attuate, anche se i dati non sono conclusivi.

5.4. Rotonda Reial Road - Baix Llobregat Av., Barcellona (Spagna)

In questo caso, la LRT attraversa la rotatoria in maniera decentrata (vedi figg. 10k, l & m), generando una situazione simile a una svolta a sinistra con problemi di visibilità. La rotonda conduce direttamente ad una strada principale e il flusso di traffico è elevato. Si sono verificati diversi incidenti perché i conducenti di veicoli stradali avevano via libera per entrare nella rotonda (semaforo 1) ma poi hanno trovato il rosso per attraversare i binari LRT (semaforo 2). Il semaforo verde 1 è pensato per quei veicoli stradali che vogliono continuare dritto ma la conseguenza è che molti conducenti che volevano girare a sinistra sono entrati nella rotonda e non si aspettavano di vedere il rosso 2, poiché nelle rotatorie senza LRT il veicolo stradale ha sempre la precedenza una volta entrato alla rotonda.

Le misure messe in atto (durante l'anno 2007) sono state le seguenti (figg. 10k, l & m):

- migliorare la percezione (e consentire un tempo di reazione più lungo in caso di una situazione rischiosa) spostando la linea di arresto il più lontano possibile dai binari della LRT;
- migliorare la protezione modificando il ciclo dei semafori, mettendo in funzione le luci rosse per l'entrata nella rotatoria ogni volta che si avvicina la LRV. Questa misura ha l'inconveniente di peggiorare il flusso di traffico stradale e può portare a livelli di congestione più elevati.

L'evoluzione del numero di incidenti in questo luogo è

height), to reinforce the awareness of road vehicle drivers arriving to the intersection;

- *new traffic lights have been provided at the entrances to the roundabout that are close to the LRT tracks crossing.*

Additionally, a road safety campaign was performed distributing leaflets to road vehicle drivers, which reminded them about road safety rules (Fig. 10h). Even a TV program about road safety was sponsored.

The evolution of the number of crashes and of the number of emergency brakes (in brackets) in this location is the following: June to end of 2007: 9 (64); year 2008: 7 (24); 2009: 4 (29); 2010: 2 (14); 2011: 1 (9); 2012: 0 (11); 2013: 3 (12). Again, in this case the reduction can be due to the learning time of other street-users, mentioned before. In any case, it seems that there has been a slight improvement due to the measures implemented, although data are not conclusive.

5.4. Reial Road - Baix Lobregat Av. roundabout, Barcelona (Spain)

In this case, the LRT crosses the roundabout off-centered (figs. 10k,l&m), generating a situation similar to a left-turn with visibility problems. The roundabout leads directly to a highway, and the traffic flow is high. There were several crashes because road vehicle drivers had green light for entering the roundabout (traffic light 1) but then they found a red light for crossing the LRT tracks (traffic light 2). The green light 1 is thought for those road vehicles who want to continue straight-on but the consequence is that many drivers that wanted to turn left entered in the roundabout and they did not expect to see a red light 2, as in roundabouts without LRT the road vehicle always has the priority once it has entered the roundabout.

The measures applied (during year 2007) were as follows (figs 10k,l&m):

- *improving perception (and allowing for a longer reaction time in case of a risky situation) by moving away the stopping line as far away as possible from the LRT tracks;*
- *improving protection by changing the traffic lights cycle, implementing red lights for the entrance to the*

la seguente: anno 2006:10 incidenti; anno 2007:8; 2010: 1; 2011: 2; 2012: 3; 2013: 1. Sembra che ci sia stato un miglioramento a causa delle misure attuate.

6. Conclusioni

In alcuni paesi europei, le rotatorie sono una soluzione molto comune per le intersezioni senza LRT giacché forniscono un flusso di traffico sicuro e quasi continuo, trasformando le manovre complicate in svolte a destra. Tuttavia, il funzionamento della rotonda cambia quando si inserisce un sistema LRT, con la perdita di precedenza da parte dei conducenti di veicoli stradali quando la LRV è presente o in avvicinamento. A volte, questo cambiamento nella gestione della rotonda può portare a confusione, e questo è il motivo per cui le rotatorie LRT non devono essere utilizzate come soluzione generale, ma solo quando ci sono dei validi motivi che rendono questa configurazione più consigliabile rispetto ad un incrocio a raso tradizionale controllato da semafori. Questi motivi sono normalmente legati ai movimenti che si devono consentire all'incrocio o alla configurazione delle strade che convergono nella rotatoria.

Se si sceglie una rotonda come soluzione più adatta per una determinata intersezione LRT, deve essere progettata attentamente per garantire una completa comprensione della situazione da parte dei conducenti di veicoli stradali. È necessario tenere presenti gli aspetti di progettazione generali legati alla visibilità, alla percezione e alla protezione del sistema LRT. Oltretutto, l'inserimento della LRT nella rotatoria deve essere attento ad evitare situazioni in cui l'attenzione dei conducenti di veicoli stradali deve essere rivolta in due direzioni diverse. Inoltre, la dimensione e il numero di corsie devono essere ridotti al massimo, ma in linea con il volume di traffico. Peraltro, il design della zona di arresto prima dei binari LRT, gli attraversamenti pedonali sulle uscite e la forma della rotatoria sono da tenere in considerazione per garantire sicurezza e una buona prestazione della rotatoria. Infine, in prossimità dei semafori si possono mettere in atto alcune misure per evitare l'infrazione da parte dei conducenti di veicoli stradali, intenzionale o non intenzionale, nei punti particolarmente problematici/critici.

roundabout whenever the LRV is approaching. This measure has the inconvenience of worsening road traffic flow and can lead to higher levels of congestion.

The evolution of the number of crashes in this location is the following: year 2006: 10 crashes; year 2007: 8; 2010: 1; 2011: 2; 2012: 3; 2013: 1. It seems that there has been an improvement due to the measures implemented.

6. Conclusions

Roundabouts are a very common solution for intersections without LRT in some European countries, as they provide a safe and almost continuous traffic flow, transforming complicated maneuvers into right turns. Nevertheless, the roundabout operation changes when an LRT system is implemented through it, with the loss of priority of road vehicle drivers when the LRV is present or approaching. Sometimes, this change in the roundabout management can lead to confusion, and this is why LRT roundabouts should not be used as a general solution, but only when there are strong reasons that make this configuration more advisable than a conventional at-grade intersection controlled by traffic lights. These reasons are normally related to the movements that need to be allowed at the intersection, or to the configuration of the streets that converge on the roundabout.

If a roundabout is selected as the most suitable solution for a specific LRT intersection, it has to be carefully designed to ensure a complete understanding of the situation by road vehicle drivers. The general design aspects related to visibility, perception and protection of the LRT system have to be born in mind. In addition, the insertion of the LRT in the roundabout has to be appropriate to avoid situations where the road vehicle drivers' attention needs to be diverted in two different directions. Moreover, the size and number of lanes has to be as small as possible, but in consonance with the traffic volume. Furthermore, the design of the stopping zone before the LRT tracks, the pedestrian crossings on the exits and the shape of the roundabout have to be considered to ensure safety and a good performance of the roundabout. Finally, some measures can be applied to traffic lights for avoiding the infringement by road vehicles drivers, either intentional or unintentional, in specifically troublesome locations.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] FONTAINE L. et al, "Operation and safety of tramways in interaction with public space. Analysis and Outcomes", Detailed Report, COST (European Cooperation in Science and Technology), September 2015. ISBN: 978-2-11-139720-0. Available on-line: http://www.tram-urbansafety.eu/IMG/pdf/TU1103_Report.pdf?1274/d52c37c1f4dff06140c8c6a47bf12713bbdfbfe8 (access 2016/06/29).
- [2] NOVALES M., TEIXEIRA M., "Getting a safer LRT through a better design of its insertion in public space", 13th National Light Rail & Streetcar Conference, APTA (American Public Transportation Association) & TRB (Transportation Research Board), Minneapolis, MN, November 15-17, 2015.

- [3] NOVALES M., FONTAINE L., BERTRAND D., SUCHA M., TEIXEIRA M., WALMSLEY D., "European tramways safety: from accidents data collection to urban insertion improvements", World Congress on Railway Research, Ferrovie dello Stato Italiane & Trenitalia, Milano, Italy, 29 May-2 June, 2016.
- [4] KORVE H.W., OGDEN B.D., SIKES J.T., MANSEL D.M., RICHARDS H.A., GILBERT S., BONI E., BUTCHKO M., STUTTS J.C., HUGUES R.G., "TCRP Report 69: Light Rail Service: Pedestrian and Vehicular Safety", TRB (Transportation Research Board), Washington DC, 2001. ISBN 0-309-06704-9.
- [5] KORVE H.W., FARRÁN J.I., MANSEL D.M., LEVINSON H.S., CHIRA-CHAVALA T., RAGLAND D.R., "TCRP Report 17: Integration of Light Rail Transit into City Streets", TRB (Transportation Research Board), Washington DC, 1996. ISBN 0-309-05723-X.
- [6] PECHUEX K.K., GOLEMBIEWSKI G.A., "Driver Comprehension and Assessment of Traffic Control Devices at Signalized Intersections Interfacing with Light Rail Transit", Transportation Research Record, Vol. 2219, 2011, pp. 1-9.
- [7] CLEGHORN D., CLAVELLE A., BOONE J., MASLIAH M., LEVINSON H.S., "TCRP Report 137: Improving Pedestrian and Motorist Safety Along Light Rail Alignments", TRB (Transportation Research Board), Washington DC, 2009. ISBN 978-0-309-11808-8.
- [8] PECHUEX K.K., SAPORTA H., "TCRP Synthesis 79: Light Rail Vehicle Collisions with Vehicles at Signalized Intersections", TRB (Transportation Research Board), Washington DC, 2009. ISBN 978-0-309-09821-2.
- [9] FARRÁN J.I., "No Turns Allowed. Controlling Vehicles Turning in Front of Light Rail Vehicles", Transportation Research Record, Vol. 1704, 2000, pp. 85-89.
- [10] COIFMAN B., BERTINI R.L., "Median Light Rail Crossings: Accident Causation and Countermeasures", California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-97-13, 1997.
- [11] CURRIE G., REYNOLDS J., "Managing Trams and Traffic at Intersections with Hook Turns: Safety and Operational Impacts", Transportation Research Record, Vol. 2219, 2011, pp. 10-19.
- [12] CERTU, "Giratoires et Tramways. Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramways. Guide de Conception", CERTU (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques), 2008. ISBN: 978-2-11-097155-5.
- [13] POCHOWSKI A., PAUL A., RODEGERDTS L.A., "NCHRP Synthesis 488: Roundabouts Practices. A Synthesis of Highway Practice", Transportation Research Board (TRB), Washington DC, 2016. ISBN 978-0-309-27208-7.
- [14] RODEGERDTS L., BANSEN J., TIESLER C., KNUDSEN J., MYERS E., JOHNSON M., MOULE M., PERSUAD B., LYON C., HALL-MARK S., ISEBRANDS H., CROWN R. B., GUICHET B., O'BRIEN A., "NCHRP Report 672. Roundabouts: An Informational Guide", Transportation Research Board (TRB), Washington DC, 2010. ISBN 978-0-309-15511-3.
- [15] LABONNEFON V., PASSELAIGUE J.-M., FONTAINE L., "Accidentology of tramways. Analysis of Reported Events: year 2012, evolution 2004-2012", STRMTG (Technical Office for Mechanical Lifts and Guided Transport Systems), 2014. Available on-line: http://www.strmtg.equipement.gouv.fr/en/IMG/pdf/Accidentology_Of_Tramways_-_Analysis_Of_Reported_Events2012_ENGLISH_1_LF_vg.pdf (access 2016/06/21).
- [16] NOVALES M., TEIXEIRA M., FONTAINE L., "LRT Urban Insertion and Safety: European Experiences", Transportation Research Record, Vol. 2419, 2014, pp. 63-81.
- [17] MARTI C.M., MONTI F., NOVALES M., "Road junctions and roundabouts with tramways", Special session about the COST Action TU1103 "Operation and safety of tramways in interaction with public space", European Transport Conference 2015, 28-30 May 2015, Frankfurt, Germany.
- [18] TYDLACKA J., VOIGT A.P., LANGFORD III W.C., "Evaluation of Lighted Pavement Marker Stop Bars at Intersections with Light Rail Lines", Transportation Research Record, Vol. 2250, 2011, pp. 49-56.