

ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ DELLA MARCIA DI VEICOLI A DUE RUOTE SU PAVIMENTAZIONI LAPIDEE IRREGOLARI

M. Crispino*, A. Tasora **, E. Vaghi*

* *DIAR – Sezione Infrastrutture Viarie, Politecnico di Milano, P.zza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano*

** *DIE – Politecnico di Milano, P.zza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano*

La notevole diffusione, in Italia ed in molti altri Paesi, di pavimentazioni ad elementi lapidei in ambito urbano non ha trovato ad oggi la necessaria corrispondenza in un'attenta analisi dei problemi di sicurezza precipui di queste sovrastrutture. In particolare, i veicoli a due ruote sono molto sensibili alle discontinuità localizzate tipiche del piano stradale di queste sovrastrutture, generate per effetto di fenomeni di degrado che si innescano a diversi livelli della pavimentazione. Ai fini della misura delle prestazioni attuali di sicurezza della strada e conseguentemente della programmazione della manutenzione, è necessario definire classi di severità del dissesto in relazione al rischio reale indotto sui veicoli. Tale supporto per il monitoraggio è in corso di messa a punto nell'ambito di una più ampia ricerca sulle pavimentazioni ad elementi lapidei condotta presso il Politecnico di Milano (DIAR – Sezione Infrastrutture Viarie), comprendente l'indagine dei meccanismi di degrado anche in presenza di inserzioni tranviarie e la messa a punto di metodi efficaci di posa e manutenzione [Crispino, 2001].

La perdita di controllo durante la marcia dei veicoli a due ruote a seguito di sollecitazioni indotte da irregolarità superficiali della pavimentazione si caratterizza per la notevole varietà e complessità

dell'innescare e dell'evoluzione dei meccanismi perturbativi, che si traducono in situazioni pericolose per l'utente. È pertanto necessario ricorrere a modellazioni meccaniche del sistema uomo-veicolo che permettano di simulare la marcia dopo l'impatto con un'accuratezza sufficiente, col vincolo che il dettaglio del modello e la durata della simulazione non compromettano, con un onere di calcolo insostenibile, l'analisi di un'ampia casistica, esaustiva di situazioni di rischio potenziale. Un buon compromesso, nella ricerca in corso, è stato individuato nelle tecniche di tipo *multibody*. Anche la disponibilità di strumenti numerici adeguati, però, non esime da un attento approfondimento della definizione delle situazioni di rischio, in quanto condizioni di marcata ed evidente pericolosità, come la diversione dei pneumatici nelle rotaie o nei solchi inter-elemento, non costituiscono che una parte marginale dell'insieme delle situazioni pericolose che è necessario rilevare ed analizzare.

In tale contesto, nel presente articolo viene riportato e discusso lo studio condotto per la valutazione di indici di pericolosità inerenti la marcia di veicoli a due ruote su un piano stradale irregolare, evidenziando la loro traduzione in quantità fisiche direttamente calcolabili o misurabili, quali forze scambiate, spostamenti imposti o accelerazioni provocate in punti precisi del sistema uomo-veicolo. La definizione dei criteri da adottare, la loro motivazione, il confronto con altri che si è deciso di non considerare e la gerarchizzazione delle situazioni di rischio sono affrontati con riferimento ad un tipo particolare di veicolo, utente e pavimentazione, analizzando anche le limitazioni di validità dell'analisi conseguenti alle assunzioni effettuate.

Si tratta di uno studio inquadrato in un'ampia ricerca che affronta, con un approccio del tutto innovativo, il problema della pericolosità di circolazione dei veicoli a due ruote su pavimentazioni irregolari, spesso trascurato in ambito stradale.

1. Introduzione

Presso il Politecnico di Milano è da tempo attivo un gruppo di ricerca sulle pavimentazioni lapidee che si è occupato di indagarne aspetti progettuali, costruttivi, manutentivi e di interazione con le sovrastrutture tranviarie. Attualmente è in corso la messa a punto di un criterio quantitativo per definire lo stato attuale di

conservazione della pavimentazione ai fini della sicurezza della circolazione dei veicoli. Pavimentazioni lapidee degradate (fig.1) costituiscono situazioni di rischio potenziale percepite ed effettive soprattutto per i veicoli a due ruote, in particolare biciclette, la cui ridotta stabilità intrinseca può essere compromessa dalle irregolarità superficiali del piano stradale. La ricorrenza statistica di incidenti con lesioni si coniuga con la consapevolezza generalizzata del degrado del confort di marcia cui sono assoggettate tali utenze, costringendo le amministrazioni coinvolte ad una continua e costosa manutenzione delle sovrastrutture esistenti. In proposito è avvertita l'esigenza di mettere a punto strumenti diagnostici e di classificazione dello stato della rete basati su valutazioni non soggettive, sia per una programmazione razionale della manutenzione sia come strumento di tutela del proprio operato (di fronte alle proteste dei cittadini e talvolta all'azione della magistratura).

Un'indagine bibliografica approfondita ha confermato la latenza pressoché completa fino ad oggi della ricerca scientifica su quest'applicazione. Conseguentemente, il gruppo di ricerca si è occupato anche di aspetti preliminari all'analisi del fenomeno, tra cui la definizione quantitativa di "situazione rischiosa", esaminando la dinamica del sistema uomo-veicolo-pavimentazione ed estraendo i parametri indicatori del grado di compromissione della stabilità di marcia, che, oltre che rappresentativi, devono corrispondere a quantità calcolabili con i metodi di simulazione introdotti.

La descrizione dei parametri indicatori, presentata nell'intervento, collocandosi a monte dell'applicazione alle sovrastrutture lapidee, si caratterizza pertanto per una elevata generalità, potendo essere applicata a qualsiasi problema di determinazione del



Fig. 1. Pavimentazione lapidea dissestata

comportamento dei veicoli a due ruote su irregolarità concentrate del piano stradale, e prestandosi ad essere estesa dal caso delle biciclette, qui esposto, all'analisi del comportamento delle motociclette, su qualsiasi tipo di pavimentazione sconnessa.

Le irregolarità del piano stradale considerate sono definite discontinuità. Ai fini della presente ricerca è stata definita discontinuità di un piano stradale una sua sconnessione, comunque orientata rispetto alla traiettoria del veicolo, con traslazione verticale di uno dei due semipiani e raccordo tramite superficie verticale. In pratica si sono analizzati "gradini" netti della superficie percorsa dal veicolo.

2. Modellazione del sistema uomo - veicolo

Lo strumento adottato per la determinazione del comportamento del sistema uomo-veicolo nelle condizioni di interesse è stata una modellazione di tipo multibody, riprodotte il veicolo ed il corpo umano alla guida, nonché la sottostante pavimentazione (fig.2). Particolare attenzione hanno richiesto la scelta e la caratterizzazione dei sotto sistemi descrittivi il corpo umano e il contatto pneumatico pavimentazione. Essi hanno richiesto la codifica di moduli specifici ed un'ottimizzazione spinta dei procedimenti di calcolo [Righettini, 1999], che permettesse di non rinunciare, a causa di un onere di calcolo elevato, all'esame di una casistica significativa. Pertanto è stato scartato l'utilizzo di software commerciali, preferendo lo sviluppo di un codice proprio in grado di gestire "economicamente" i 17 corpi rigidi collegati da 18 cerniere, per un numero totale di quasi 200 variabili (102 coordinate e 92 vincoli scalari).

Simulazioni preliminari hanno mostrato che un intervallo di simulazione di durata relativamente contenuta (1000ms) è sufficiente per l'indagine degli aspetti di interesse, mantenendo un livello di dettaglio piuttosto elevato nella specificazione del corpo del ciclista. Lo schema adottato è quello di Drillis e Contini [Winter, 1990], che riproduce lo scheletro e le sue articolazioni principali tramite 13 segmenti rigidi. La pubblicazione citata fornisce la massa, la posizione del centro di massa ed il tensore d'inerzia di ogni segmento in funzione dell'altezza e del peso del corpo, definendo in riferimento al corpo umano medio le proprietà geometriche e di massa del modello (fig. 3).

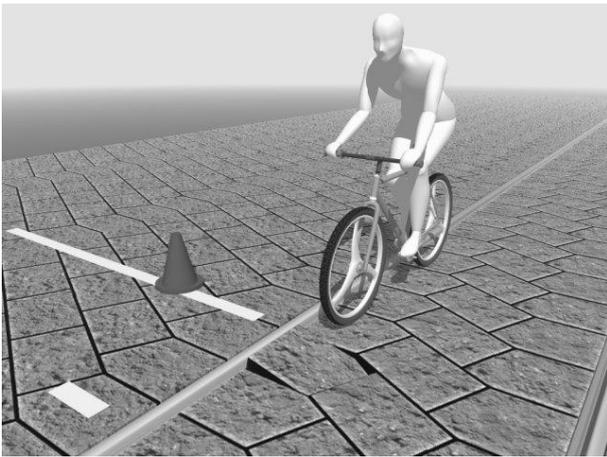


Fig. 2: Modello multibody completo (bicicletta con utente) in moto su pavimentazione dissestata.

Non sono state invece reperite indicazioni bibliografiche per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche delle articolazioni, laddove emerge la necessità aggiuntiva di attribuire una tensione a determinati muscoli per il mantenimento della posizione corretta di marcia del ciclista. Lo stratagemma qui utilizzato è stato quello di introdurre molle torsionali per ogni cerniera e dei controllori PID elementari per alcuni muscoli; quindi il modello del corpo del ciclista è stato posto in posizione corretta, determinando i valori minimi dei controlli che consentono il mantenimento della posizione sotto l'azione della forza di gravità.

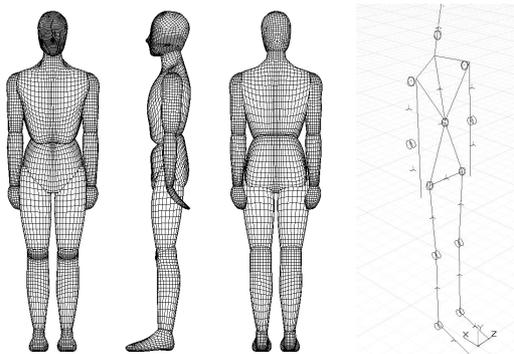


Fig. 3: Modello multibody (maschio, h 177 cm, peso 70 kg) e rappresentazione sintetica dei segmenti che compongono il modello a corpi rigidi. Si evidenziano i vincoli (cerniere sferiche), i centri di massa e i sistemi di riferimento mobili.

L'altezza ed il peso del ciclista non sono stati ricavati da statistiche sulla popolazione complessiva, ma si è provveduto ad un'analisi specifica sul sottoinsieme costituito dagli utenti di mezzi a due ruote, che presenta caratteristiche abbastanza specifiche soprattutto come distribuzione in fasce d'età e caratteristiche generali di condizione fisica. Da un campione di 197 elementi sono

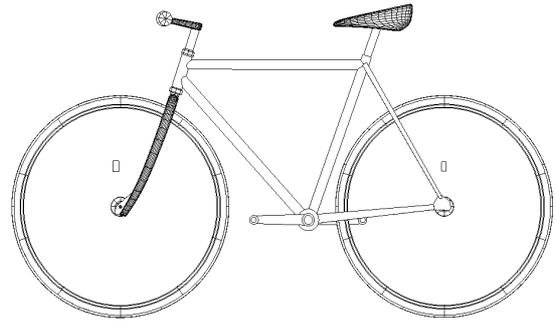


Fig. 4. Modello a corpi rigidi della city-bike (forcella, telaio, ruote, pedivella).

stati estratti il ciclista medio, alto 177 cm e pesante 70 kg, e la ciclista media, alta 166 cm e pesante 51 kg. Simulazioni successive hanno però mostrato differenze trascurabili nel comportamento dei due modelli, per cui si è ritenuto sufficiente l'utilizzo di uno solo di essi.

Il veicolo è modellato tramite cinque corpi considerati rigidi per le forze applicate. Le proprietà di massa (tensore di inerzia) sono state calcolate tramite quadratura di Gauss a partire dalla geometria del modello tridimensionale e dalle proprietà dei materiali. Sono stati riprodotti due veicoli, una mountain-bike a pneumatici tassellati ed una city-bike (fig.4). In seguito, il modello di mountain-bike non è stato utilizzato perché ha dimostrato una marcia molto meno perturbata dalle irregolarità della superficie stradale rispetto al modello di city-bike.

Il profilo del pneumatico è stato accuratamente misurato e riprodotto. Nella definizione del sottosistema descrivente l'interfaccia pneumatico-pavimentazione, esigenza primaria è stata la capacità di riprodurre il contatto in almeno due punti distinti, in quanto questa condizione si crea sempre per il superamento delle discontinuità della pavimentazione. Il modello di partenza è stato l'LRISM (Linear Radial and Interradial Spring Model) di Badalamenti e Doyle (cfr. [Schmeitz, 2001]). Esso riproduce gli effetti delle pareti del pneumatico e dell'aria interna tramite molle radiali discrete la cui deformazione è collegata a quella degli elementi adiacenti tramite molle interradianti, anch'esse agenti in direzione radiale. Il modello, originariamente bidimensionale, è stato qui esteso alle tre dimensioni (fig.5) costruendo sulla superficie del pneumatico una mesh di nodi privi di massa, ciascuno col solo grado di

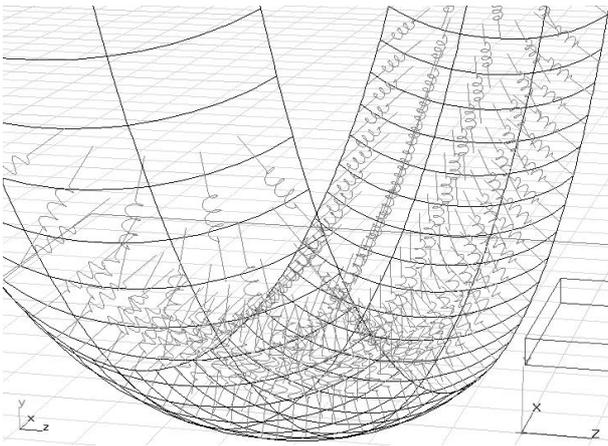


Fig. 5: Modello a molle radiali ed inter-radiali per la rappresentazione del pneumatico.

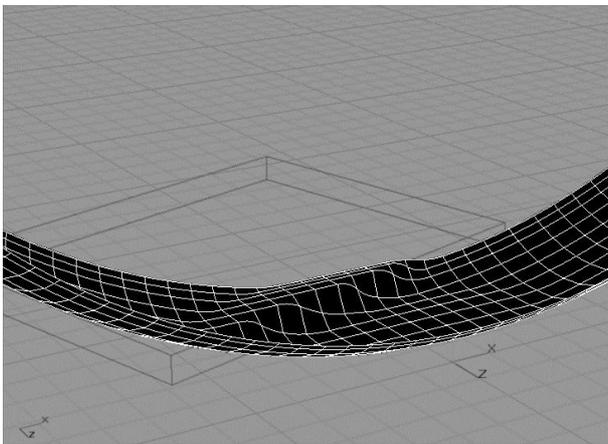


Fig. 6: Modello di pneumatico: interazione con discontinuità locali ad alta frequenza (buche, scalini)

libertà in direzione radiale e collegato da molle interradianti sia in direzione circonferenziale che trasversale. Le molle sono state caratterizzate tramite relazioni non lineari rigidezza-spostamento.

Alle molle radiali è stato applicato anche uno smorzamento, per approssimare gli effetti dell'isteresi del pneumatico, come ad esempio la resistenza al rotolamento. Il modello per il contatto così realizzato permette l'interazione con pavimentazioni descritte tramite qualsiasi tipo di superficie (fig.6), a fronte di un limitato onere computazionale [Zegelaar,1996].

Le forze tangenziali di aderenza sono riprodotte applicando un modello di attrito coulombiano per ogni nodo del pneumatico in contatto col terreno: il contributo totale di tutte le forze di attrito nodali (con direzioni orientate secondo gli scorrimenti locali), è infine responsabile dell'azione complessivamente trasmessa a terra per effetto dell'attrito.

Una descrizione dettagliata del modello del contatto e delle strategie di ottimizzazione dell'algoritmo di calcolo sono riportati in [Tasora, 2001].

La relazione carico/spostamento per il pneumatico, necessaria per determinare la funzione di rigidezza al contatto, è stata ricavata sperimentalmente, ponendo la ruota modellata su una piattaforma dinamometrica, caricandola e misurando in corrispondenza l'abbassamento del cerchione al punto di contatto. La medesima relazione per il contatto sella bacino è stata ricavata in maniera analoga. Tutto il veicolo è stato posto sulla bilancia dinamometrica, mentre un ciclista in posizione corretta, ma ancorato all'esterno, scaricava sul veicolo porzioni differenti del proprio peso. Il cedimento del sistema è stato misurato rispetto ad un indicatore fissato in corrispondenza delle creste iliache del soggetto mediante una cintura. La relazione carico spostamento è stata ottenuta tramite depurazione dei contributi dovuti allo schiacciamento del pneumatico. L'esperimento è stato ripetuto con diversi soggetti, differenti per sesso, peso e forma fisica. Differenze apprezzabili si sono riscontrate solo per le fasi iniziali del contatto, mentre in prossimità delle condizioni di seduta corretta le misure hanno mostrato una confortante stabilità.

I coefficienti di attrito per le situazioni di interesse sono stati determinati direttamente, trascinando tramite un dinamometro il pneumatico caricato sulle superfici stradali, in differenti condizioni di pulizia. I risultati dell'esperimento sono riportati in tabella 1.

Tabella 1: Coefficienti di attrito misurati per un pneumatico da bicicletta 28-622 700x28C

	Coeff. di attrito di primo distacco	Coeff. di attrito radente
Congl. Bit. – Asciutto	0.97	0.86
Congl. Bit. – Bagnato	0.90	0.88
Pav. Lapidea – Asciutto	0.68	0.65
Pav. Lapidea – Bagnata	0.62	0.61
Rotaia – Pulita	0.45	0.42
Rotaia – Bagnata e Pulita	0.38	0.38
Rotaia – Bagnata e Sporca	<0.35	<0.34

3. Applicazione del modello

Simulazioni preliminari hanno mostrato una pericolosità decisamente diversa delle stesse discontinuità per veicoli procedenti in traiettoria rettilinea e veicoli in

traiettoria curva, anche per impatti contro la discontinuità in ogni caso ortogonali.

Nelle simulazioni in corso di effettuazione per la determinazione quantitativa delle soglie di accettabilità dei dissesti, la pavimentazione di riferimento presenta sempre l'inserzione di un binario tranviario ed un solo elemento lapideo dissestato.

Il dissesto è realizzato dalla rotazione dell'elemento attorno al proprio asse longitudinale. Il primo impatto è sempre ortogonale alla discontinuità ed avviene alla distanza ragionevole di 10 cm dal bordo della rotaia, per altezze di discontinuità comprese tra -40 e +40 mm, con incrementi di 10 mm (fig.7). Il profilo di rotaia riprodotto è l'RI60, mentre la pavimentazione regolare è riprodotta tramite 499 masselli complanari disposti secondo il disegno tradizionale delle pavimentazioni lapidee a masselli; essi sono separati da una rete regolare di giunti larghi 15 mm ed abbassati di 5 mm rispetto alla superficie stradale.

Le velocità di impatto simulate variano tra $v_0=10\text{km/h}$ e $v_0=50\text{km/h}$, con incrementi di 10km/h.

Ogni combinazione di dissesto e velocità è analizzata per traiettorie di marcia rettilinea (fig.8), curva a destra e curva a sinistra (fig.9).

Negli ultimi due casi, il raggio di curvatura è dipendente dalla velocità ed è quello compatibile con un angolo di rollio ragionevole di 18° , per un'accelerazione centripeta di 3.18 m/s^2 . Le simulazioni iniziano in condizioni di marcia stabile e si prolungano per 1000 ms dopo l'impatto.

4. Definizione e valutazione dei criteri indicatori di pericolo

Il primo criterio adottato come indicatore di marcia perturbata è immediato, ed è rappresentato dal rilievo di macroscopiche deviazioni trasversali della traiettoria della ruota anteriore, superiori a 100 mm nella proiezione orizzontale del moto, entro i 1000 ms di durata della simulazione. Nel caso particolare di configurazione di traiettoria di partenza analizzato, esse danno luogo a transito sulla rotaia, con repentino abbattimento dell'aderenza al contatto ed eventuale caduta della ruota nella gola della rotaia. Impatti che diano luogo a deviazioni della ruota anteriore di questa entità configurano perturbazioni alla marcia difficilmente recuperabili (fig.10).

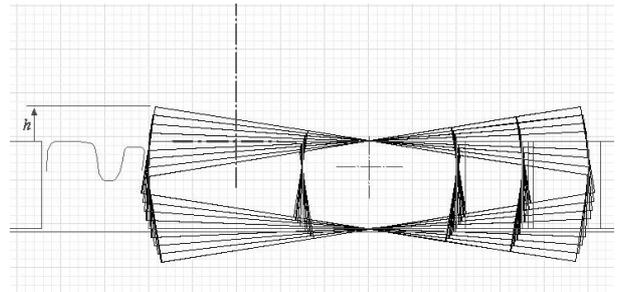


Fig. 7: Inclinazione del massello dissestato (vista in sezione trasversale rispetto alla direzione di marcia).

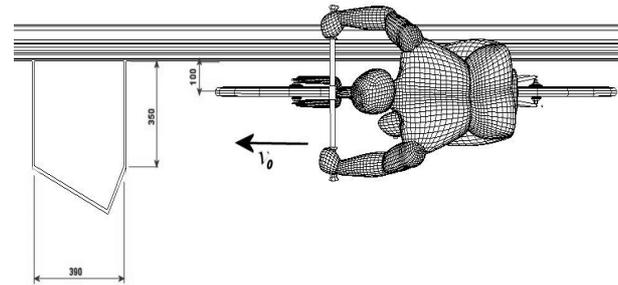


Fig. 8: Caso di veicolo in rettilinea: disposizione del massello dissestato (vista in pianta).

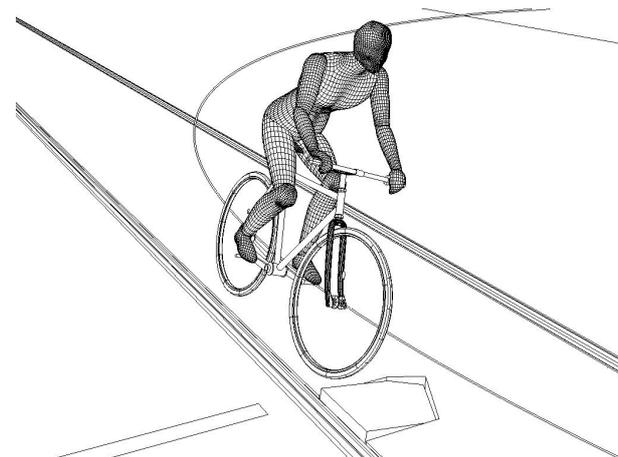


Fig. 9: Caso di veicolo in curva: traiettoria ideale impostata dall'utente e posizione del massello inclinato.

La possibilità di danneggiamento della ruota è stata considerata altra fonte certa di pericolo grave e immediato, particolarmente per i veicoli che montano pneumatici sottili. Essa, nella duplice forma di rischio di perforazione della camera d'aria o di deformazione locale del cerchione, è stata espressa come compressione eccessiva del pneumatico; cioè, fissato uno spessore minimo di sicurezza per il pneumatico compresso, si sono considerate pericolose tutte le condizioni che abbiano dato luogo ad una distanza tra superficie della pavimentazione e centro del mozzo minore del raggio esterno del cerchione incrementato di questa quantità. Una valutazione approssimativa a

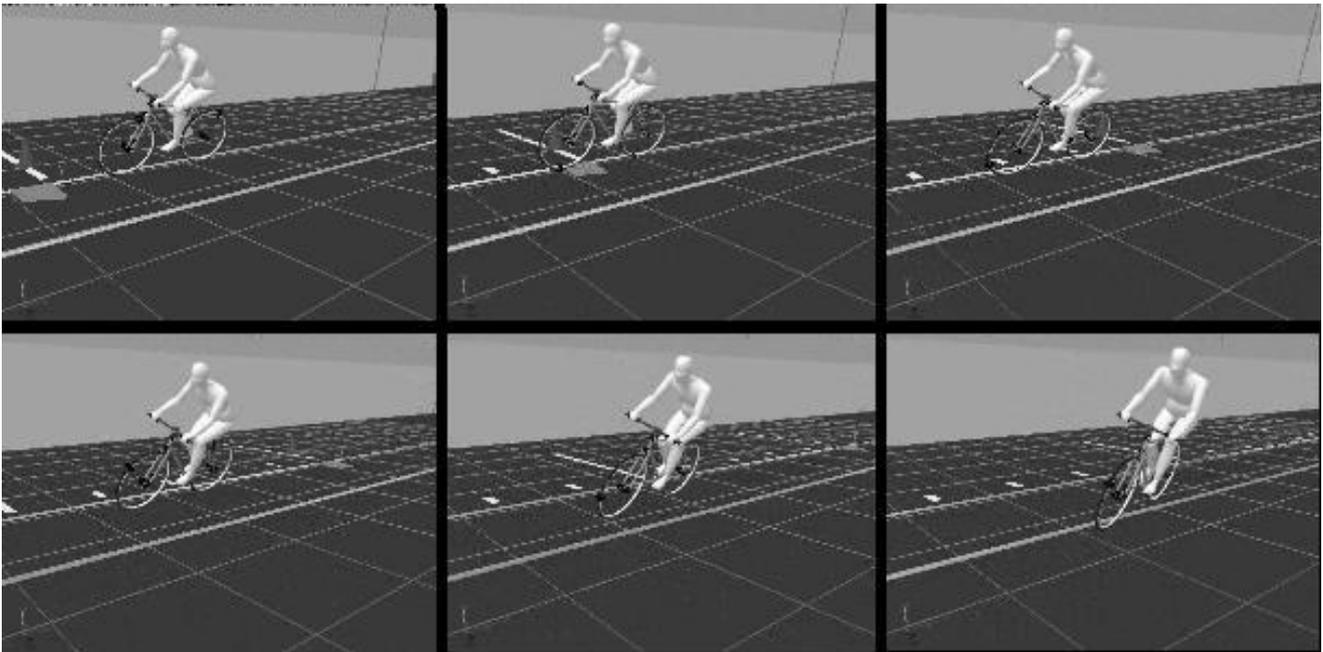


Fig. 10: Alcuni fotogrammi tratti da una delle 200 simulazioni svolte (in figura è rappresentato il caso specifico di $v_0=40\text{km/h}$, $h_{\text{scalino}} = 30\text{mm}$, curva a sinistra con inclinazione del massello verso l'interno della curva).

favore di sicurezza ha consigliato di adottare per tale grandezza il valore di 3 mm.

Il criterio adottato permette di rilevare anche il rischio di insorgenza di impatti impulsivi i quali, anche qualora non provocassero danneggiamenti alla struttura della ruota, porterebbero la natura della perturbazione ad avvicinarsi a quella di impatto fra corpi rigidi (cerchione contro pavimentazione), con conseguente discontinuità della traiettoria nel piano verticale, e con direzione fortemente dipendente dalla disposizione reciproca delle superfici dei corpi al contatto.

La possibilità di perdita della corretta posizione di guida, in particolare dello scivolamento del bacino del ciclista in avanti, oltre il sellino, rappresenta un'altra concreta situazione di rischio (fig.11). Essa è individuata quantitativamente nell'annullamento dell'azione normale trasmessa al contatto bacino sellino. Oltre a tale limitazione inferiore, un altro criterio è costituito da una limitazione superiore della stessa azione, che potrebbe dare luogo a perdita di equilibrio oppure, pur senza configurare una caduta, potrebbe tradursi in dolore e danneggiamento fisico. Il valore di accettabilità di soglia è stato fissato in 800 N sulla scorta di considerazioni fisiologiche (indicativamente, tale soglia corrisponde circa al doppio della forza scambiata col sellino in condizioni normali di marcia, e corrisponde a sensazione leggermente dolorosa con buona parte delle selle in commercio).

Un criterio comunemente adottato in altri tipi di valutazioni di pericolosità di impatto sul fisico umano è costituito dall'accelerazione della testa, la cui dannosità dipende sia dal valore, sia dalla durata, come espresso sinteticamente dall'indice HIC (Head Injury Criterion) [Kamarajan, 1999]. Si osserva che in ogni caso l'accelerazione della testa non ha mai superato il valore di 30 m/s^2 nelle nostre prove, tale da non superare HIC175: un valore trascurabile, anche se possibile causa di fastidio.

E' necessario poi limitare l'azione trasmessa al contatto mano-manubrio, diversa per ciascuna mano (fig.12). Il modulo della forza deve essere contenuto al fine di limitare le possibilità di danneggiamento fisico, ma è necessario anche tenere conto del verso dell'azione, poiché compressioni assiali del sistema polso avambraccio sono potenzialmente meno pericolose di azioni improvvise di tensione, che possono determinare la perdita della presa e conseguentemente del controllo del mezzo: ad esempio si sono considerate rischiose le situazioni in cui si superassero i 150 N di tensione. Per questo criterio, va notato che sollecitazioni di natura spiccatamente impulsiva, ove forze di compressione dell'ordine di 500 N sono conseguite per pochi millesimi di secondo, potrebbero tuttavia non essere eccessivamente pericolose in quanto di durata limitata e non sufficienti a causare la perdita dell'impugnatura.

I criteri indicati coprono uno spettro abbastanza ampio di situazioni pericolose. La lacuna più grande che essi lasciano aperta è nella rilevazione di situazioni che comportino configurazioni di caduta al di là dei 1000 ms cui è estesa la simulazione. Il primo criterio sopra esposto evidenzia la generazione di situazioni irrecuperabili già nel tempo di simulazione, che si può considerare dell'ordine di grandezza del tempo di reazione medio dell'utente.

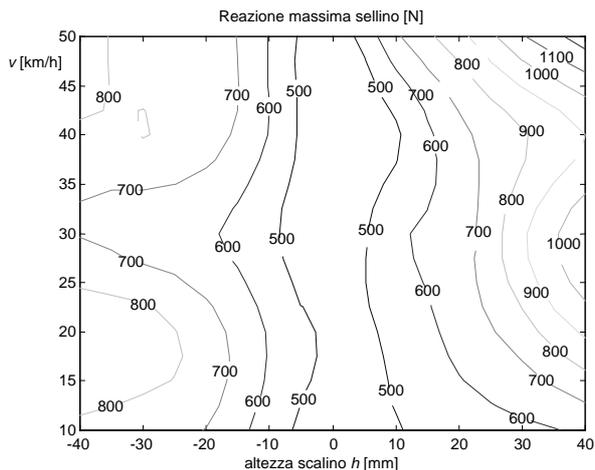


Fig. 11: Risultati dell'analisi relativa al criterio indicatore di pericolo "reazione sellino-utente", per tutte le combinazioni di velocità ed entità del dissesto (in rettilineo)

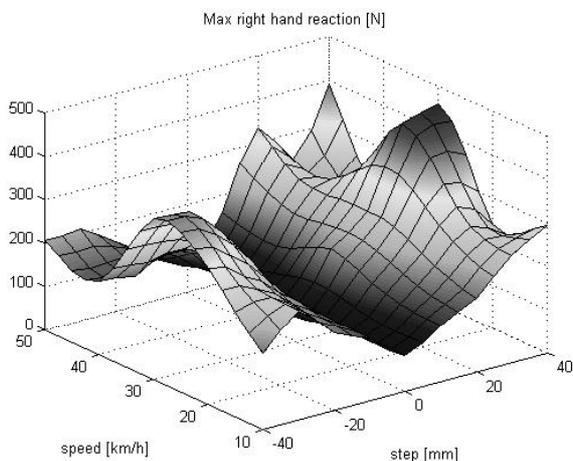


Fig. 12: Risultati dell'analisi relativa al criterio indicatore di pericolo "modulo della reazione mano destra-manubrio", per tutte le combinazioni di velocità ed entità del dissesto

Per i momenti successivi è lecito ipotizzare interventi correttivi da parte del ciclista, che limitino le conseguenze delle perturbazioni imposte alla marcia, tendendo a ripristinare condizioni di stabilità. In quest'ottica, criteri che individuino la possibilità di caduta al di là dell'intervallo di simulazione si possono ricercare

nella determinazione delle configurazioni geometriche e cinematiche alla fine dell'intervallo definenti le situazioni limite per cui una manovra correttiva propria può essere efficace.

Le condizioni ritenute significative sono lo spostamento

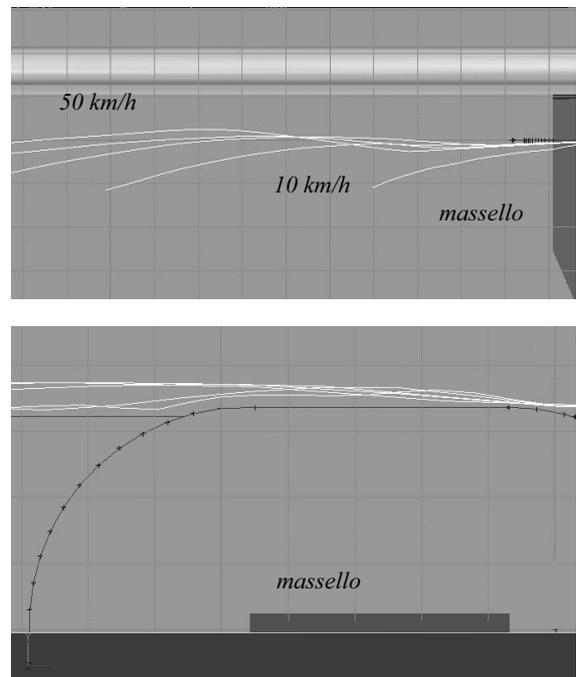


Fig. 13: Risultati dell'analisi della traiettoria della ruota anteriore dopo la collisione, per 1000ms di simulazione (viste superiore e laterale, grafici con scale non uniformi).

trasversale del punto di contatto rispetto alla traiettoria originale e gli angoli di rollio e serpeggio del telaio.

Per il primo criterio, una soglia è stata fissata in 100 mm di scarto dalla traiettoria originale (fig.13), dal momento che si è potuto osservare come in condizioni regolari di marcia i ciclisti comuni si mantengano intenzionalmente ad almeno 100 mm di distanza da buche o da binari ad essi allineati (se un ciclista percorresse deliberatamente una traiettoria molto più accostata alla rotaia, tale soglia potrebbe essere ancora più bassa, ma si stima che questo sia un comportamento anomalo in un utente disciplinato e consapevole della posizione della tranvia). In riferimento al secondo criterio, per le condizioni di aderenza direttamente misurate una schematizzazione quasi statica di tipo tradizionale limita l'angolo di rollio a 32°, oltre cui l'aderenza è insufficiente a mantenere il contatto con tali condizioni di pavimentazione. Considerazioni di cautela, derivate dall'osservazione della configurazione assunta dal sistema uomo veicolo e dalla distribuzione delle masse, spingono a considerare pericoloso qualsiasi angolo di rollio superiore a 15°,

	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
10 km/h									
20 km/h									
30 km/h									
40 km/h									
50 km/h									

Fig. 14: Tabella riassuntiva dei risultati inerenti le condizioni più restrittive evidenziate dai diversi criteri di rischio nel caso di bicicletta in traiettoria rettilinea, su masselli bagnati. Le caselle bianche sono le uniche alle quali non corrisponde alcuna delle situazioni di rischio evidenziate con i citati criteri, mentre le caselle grigie corrispondono alle situazioni che comportano l'instaurarsi di almeno una condizione di rischio. Inoltre si sono segnate in grigio scuro le situazioni che corrispondono ai rischi maggiori, ovvero cadute e possibili forature o danni al cerchione).

instauratosi a seguito di perturbazione (derivante dalla discontinuità della pavimentazione) durante la traiettoria rettilinea.

La limitazione principale sottesa all'adozione degli ultimi criteri sopra esposti è legata all'assunzione di un comportamento tempestivo e corretto da parte del ciclista, che potrebbe invece avere reazioni più lente o intraprendere azioni inconsulte e peggiorative, legate per esempio ad un momento di panico conseguente alle sollecitazioni ricevute. Condizioni più a favore di sicurezza potrebbero essere determinate allungando la simulazione di impatto e ponendo la valutazione delle stesse soglie a tempi successivi, recuperando almeno le situazioni in cui il conducente ha reazioni di rapidità intermedia.

Una modellazione di tipo multibody come quella predisposta per la presente ricerca mette a disposizione una serie di altri parametri, che possono essere adottati come indice di pericolosità o perturbazione della marcia, ma che gli autori hanno preferito utilizzare per la validazione del modello. Il confronto tra le grandezze calcolate e quelle misurate nelle situazioni riprodotte sperimentalmente è avvenuto per lo più tramite elaborazione di immagini filmate con telecamere digitali, pertanto per la calibrazione si sono preferiti parametri riconducibili alla misura di configurazioni geometriche o velocità.

In particolare, la misura delle lunghezze di salto delle ruote (fig.13) ha avuto, ai fini della validazione, importanza fondamentale. Le lunghezze dei salti compiuti dalla ruota anteriore e da quella posteriore possono essere definite come distanza dalla discontinuità al punto in cui la compressione del pneumatico ritorna uguale a quella della situazione

imperturbata in precedenza all'impatto. La lunghezza di salto così calcolata risulta più lunga di quella in cui non vi è effettivamente nessun contatto tra pneumatico e terreno, in quanto comprende nella distanza di volo anche le condizioni di aderenza incerte che si hanno nei primi istanti di ripristino del contatto. La lunghezza in proiezione orizzontale del salto, pur rappresentando una condizione di marcia non regolare, non è stata assunta come indicatore diretto di pericolo, in quanto non realizza in sé una configurazione di caduta, ma è solo condizione di rischio subordinata alla realizzazione di altri fattori.

Le deviazioni verticali dei centri dei mozzi sono ritenute indicatori importanti di pericolo per quanto riguarda la possibilità di eccessivo schiacciamento del pneumatico, con il conseguente urto fra la balconata del cerchione e la pavimentazione (come già osservato, questo può provocare il repentino sollevamento delle ruote, la foratura o il danneggiamento del cerchione).

Un altro criterio proposto, ma in seguito scartato, è stata la massima accelerazione verticale del telaio della bicicletta, in quanto gli effetti legati a questo parametro sono meglio specificati dalle forze trasmesse ai contatti mano-manubrio e sella-bacino e dall'accelerazione subita dalla testa del ciclista.

I parametri velocità massima di serpeggio e velocità massima di rollio del telaio durante la simulazione non sono stati ritenuti sufficientemente rappresentativi, come osservato da alcune simulazioni preliminari.

5. Considerazioni conclusive

Il modello costruito, calibrato e validato permette di simulare con spiccato realismo il comportamento di

biciclette nell'impatto su discontinuità della superficie stradale. Attualmente, esso è utilizzato per l'analisi di un'estesa casistica di combinazioni di tipologia ed entità di dissesto, velocità di impatto e forma di traiettoria.

Scopo ultimo della ricerca in corso è pervenire alla definizione di criteri per la classificazione delle condizioni attuali delle pavimentazioni in relazione al rischio di transito, che stabiliscano soglie di opportunità e necessità per la manutenzione oppure l'applicazione di limitazioni di velocità per i veicoli a due ruote (fig.14).

Dai risultati parziali che già sono a disposizione emerge la necessità di distinguere zone a prevalente marcia rettilinea (piste ciclabili, strade ove le biciclette non effettuino lo "slalom" tra veicoli in marcia e in sosta) da zone a traiettoria di marcia varia, in quanto prevedere la possibilità di traiettorie curve significa restringere drasticamente lo spettro delle situazioni di dissesto accettabili. Inoltre due livelli di severità del rischio possono essere introdotti: le situazioni più gravi, indicate dai criteri di perturbazione macroscopica della traiettoria e danneggiamento della ruota, che conducono direttamente a situazioni irrecuperabili, e situazioni di rischio comunque alto ma meno grave, quelle indicate dagli altri criteri suggeriti ove, anche nella realizzazione delle condizioni di rischio, opportune rapide correzioni da parte del ciclista possono portare al recupero della stabilità.

Altre estensioni dell'analisi, al di là di quanto attualmente in corso, dovrebbero analizzare posture diverse, conseguenti a veicoli diversi, pneumatici di altro tipo, in particolare più sottili, l'effetto di zaini, borse appese, etc., situazioni di dissesto estese a più elementi di pavimentazione, impatti con discontinuità non ortogonali alla traiettoria. Pertanto i valori quantitativi che saranno forniti definiranno solamente situazioni di rischio eccessivamente elevato, senza la pretesa di certificare come pavimentazione sicura ciò che rientra nelle soglie proposte.

6. Bibliografia

[Crispino, 2001] Crispino M., Venturini L., *Analisi sperimentale su resine poliuretatiche per la sigillatura delle pavimentazioni stradali a masselli*, XI Convegno Nazionale SIIV, Verona, Novembre 2001

[Kamarajan, 1990], Jawahar Kamarajan, Rajkumar Rajagopalan, Vikas Gupta, *Effects of Multiple Impacts*

on Head Injury Criteria, SAE technical paper series, 1999-01-0297.

[Righettini, 1999] P.Righettini, A.Tasora. *Application of quaternion algebra to the efficient computation of jacobians for holonomic-rheonomic constraints*, Euromech 404 - Advances in computational multibody dynamics, Lisboa, Portugal

[Schmeitz, 2001] Schmeitz A.J.C. and Pauwelussen J.P., *An Efficient Dynamic Ride and Handling Tyre Model for Arbitrary Road Unevennesses*, VDI-Berichte NR. 1632, pp. 173-199, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany, 2001.

[Tasora, 2001] Tasora A., *An optimized lagrangian-multiplier approach for interactive multibody simulation in kinematic and dynamical digital prototyping*, VIII International Symposium on Computer Simulation in Biomechanics, 4-6 July 2001, Politecnico di Milano, Italy.

[Winter, 1990], D.Winter, *Biomechanics and motor control for human movement*, Wiley-Interscience; ISBN: 0471509086

[Zegelaar,1996] Zegelaar, P.W.A., H.B. Pacejka; *The in plane dynamics of tyres on uneven roads*. Proceedings of the 14th IAVSD symposium, The dynamics of vehicles on roads and on tracks. Swets & Zeitlinger, Lisse, 1996, p. 714-730. ISBN code 90-265-1474-3.