

Commissione Ingegneria Forense Infortunistica dei Trasporti

Abstract

Nell'ambito della stesura dei quaderni tecnici sullo stato dell'arte delle discipline di Ingegneria Forense promossi dall'omonima commissione dell'Albo degli Ingegneri di Firenze ed in particolare sul tema dell'Infortunistica dei Trasporti è stato scelto di affrontare, data la sua attuale importanza, il tema dell'infortunistica degli "utenti vulnerabili" della strada.

Per utenti vulnerabili (o "deboli") della strada si intendono i conducenti e passeggeri di mezzi a due ruote (velocipedi e ciclomotori) ed i pedoni, così come definito dall'Art.3 comma 53 bis del Codice della Strada i quali "meritano una tutela particolare dai pericoli derivanti dalla circolazione sulle strade". Sebbene le metodologie di calcolo siano in generale differenti per pedoni, ciclisti e motociclisti queste tipologie di utenti sono soggette alla problematica della visibilità e avvistamento in particolare da parte dei conducenti dei veicoli protetti da strutture esterne e dall'utilità di introdurre dei criteri sulla valutazione della gravità delle lesioni subite.

Il primo degli approfondimenti sul tema dell'infortunistica degli "utenti vulnerabili" della strada è stato redatto dal collega Ing. Massa e riguarda gli "Elementi sulla incidentalità del ciclista".

Firenze, 14.4.18

Ing. Luca Del Gigia
Ing. Massimo Massa
Ing. Andrea Ottati

**Commissione Ingegneria Forense
Infortunistica dei Trasporti
Elementi di infortunistica sulla incidentalità del
ciclista**

Ing. Massimo Massa
Studio di Ingegneria Forense
Piazza M.d'Azeglio, 18 – 50121 Firenze
info@studio-massa.it

Sommario

1.1 Incidentalità del ciclista	3
1.2 Lesività del corpo del ciclista	4
1.3 Sistema di frenatura della bicicletta	6
1.4 Dinamica nella decelerazione da frenatura della bicicletta	7
1.4 Parametri della decelerazione da frenatura della bicicletta	10
Casi studio	
2.1 Analisi della trasmissione delle forze durante la frenata	13
2.2 Analisi del ribaltamento	14
2.3 Analisi della trasmissione delle forze durante il percorso in discesa	15
Studio sperimentale	
3.1 Prova d'impatto ciclista contro autovettura	16
Bibliografia	18

1.1 Incidentalità del ciclista

Il velocipede, secondo l'Art. 50 del CdS, è un veicolo con due o più ruote funzionanti a propulsione esclusivamente muscolare, per mezzo di pedali o di analoghi dispositivi, azionati dalle persone che si trovano sul mezzo. Risultano altresì considerati velocipedi le biciclette a pedalata assistita, dotate di un motore ausiliario elettrico avente potenza nominale continua massima di 0,25 KW la cui alimentazione è progressivamente ridotta e, infine, interrotta quando il veicolo raggiunge i 25 km/h o prima se il ciclista smette di pedalare.

Dai recenti dati Istat nel 2016 si sono verificati in Toscana 16.507 incidenti stradali, che hanno causato la morte di 249 persone e il ferimento di altre 22.022. Rispetto al 2015 aumentano sia gli incidenti (+4,1%) che i feriti (+5,1%), con incrementi percentuali molto maggiori di quelli rilevati nell'intero Paese (rispettivamente, +0,7% e +0,9%). Anche il numero delle vittime della strada è in crescita, ma in misura notevolmente minore (+0,8%), e risulta in controtendenza con il dato medio nazionale (-4,2%). Il dato di rilevanza sociale risulta l'aumento dei casi di incidenti mortali che riguardano gli "utenti vulnerabili" come i ciclisti (+27% nel 2015), mentre diminuiscono le vittime tra i conducenti e passeggeri di ciclomotori (-27,3%), motocicli (-3,2%) e autovetture (-7%).

Il numero degli incidenti in ambito urbano che coinvolge i conducenti dei velocipedi risulta in continuo aumento, basta pensare che gli incidenti stradali sulle strade urbane, che complessivamente incidono del 75% con un 44% di vittime, riguarda per tipologia di utente il ciclista con una percentuale dell'8,8%.

Per tali motivi il fenomeno necessita di una analisi nel dettaglio allo scopo di fornire all'ingegnere degli elementi utili alla ricostruzione dell'incidente, nozioni queste che vogliamo concentrare sulla lesività del corpo del ciclista, sulle sue accelerazioni conseguenti ad un urto e sulle possibili decelerazioni del movimento della bicicletta.

1.2 Lesività del corpo del ciclista

Le lesioni dell'utente debole della strada come il ciclista, in caso di impatto si possono paragonare a quelle di un investimento del pedone con particolari differenze come la difforme altezza del baricentro (variabile dall'altezza del sellino), l'utilizzo del casco protettivo e la velocità di collisione. Generalmente infatti la velocità del ciclista, che può ritenersi variabile dai 10 km/h sino a quella di circa 35 km/h relativa ai cicloamatori, è superiore rispetto a quella dei pedoni.

Gli elementi utili alla ricostruzione della dinamica dell'evento e quindi alla valutazione della velocità di urto del veicolo investitore e di informazioni sull'utilizzo di sistemi protettivi, riguardano la localizzazione e l'entità delle lesioni.

La lesività del ciclista, paragonabile a quella del pedone che può localizzarsi maggiormente sulla testa, sul tronco e sugli arti, interessa lo scheletro, i muscoli e gli organi interni.

Durante le fasi di investimento, si determinano delle particolari tipologie di lesione dovute al primo un urto laterale o frontale seguito dal caricamento, dalla successiva proiezione e caduta al suolo con strisciamento e quindi al possibile arrotamento con sormontamento delle ruote sul corpo. Ciascuna di queste fasi è caratterizzata da particolari tipologie lesive come le fratture all'arto inferiore nell'urto laterale per impatto contro il paraurti di autovettura e come le fratture ed escoriazioni con ecchimosi sulle parti sporgenti del corpo (gomiti, ginocchia e mani) per l'urto frontale. L'esame della qualità, entità ed ubicazione delle lesioni consente di ricostruire la posizione iniziale del ciclista al momento dell'impatto e la direzione delle forze scambiate.

La fase di caricamento del corpo del ciclista sull'anteriore di una autovettura, risulta paragonabile a quella del pedone con il suo avvolgimento sul cofano motore procurandosi lesioni addominali, traumi toracici con frequente urto della testa contro il cristallo del parabrezza o, con conseguenze più gravi, contro la robusta struttura dei ravvicinati montanti. Altresì la fase di caduta e proiezione a terra può prevedere l'appiattimento degli arti con fratture isolate della clavicola e della gabbia toracica mentre durante lo strisciamento al suolo possono provocarsi lesioni cutanee da abrasioni

superficiali. Le lesioni da schiacciamento caratterizzano la fase dell'arrotamento con fratture ossee e agli organi interni.

Le indagini per la ricostruzione delle modalità di collisione tra una bicicletta ed un veicolo, devono pertanto considerare l'esame dei danneggiamenti, quella del casco protettivo e degli indumenti del ciclista, l'individuazione di tracce biologiche sulla strada e sugli indumenti oltre all'esame della cartella clinica, dei referti diagnostici o dell'esame autoptico. Importante risulta anche l'accertamento delle condizioni di reciproco avvistamento dei conducenti in funzione della visualità offerta dalla configurazione della strada e della visibilità ambientale.

Per classificare le lesioni riscontrate sul corpo del ciclista e quindi ottenere dei dati utili all'interazione tra l'ingegnere ricostruttore ed il medico legale nell'ambito biomeccanico, i criteri risultano gli stessi utilizzati in ambito automobilistico. L'analisi delle lesioni sul corpo prevede che per ogni sua parte e per ogni organo interno sia possibile definire un codice numerico da 1 a 6 corrispondente a seconda del danno riscontrato secondo la scala AIS (Abbreviated Injury Scale). Esistono altri criteri di classificazioni per parti del corpo specifici come la testa che si riferiscono alle accelerazioni subite dal suo baricentro (HIC, Head Injury Criterion) che prevede un limite per la sopravvivenza di $HIC = 100$. A tale proposito per l'impatto ciclista-auto o per la caduta del corpo con urto del cranio al suolo a velocità sostenuta (lesioni molto gravi o mortali), tale valore viene superato. Il calcolo dell'HIC, connesso direttamente con la frattura cranica, si basa su una elaborazione dell'accelerazione risultante nel baricentro della testa del manichino:

$$HIC = t_2 - t_1 \left(\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \quad \text{dove } a(t) \text{ è l'accelerazione risultante espressa in}$$

g e t_1 e t_2 l'intervallo di tempo che comprende il picco di accelerazione dovuto all'urto e compreso all'interno della durata dell'urto stesso.

Altro criterio è il VC (Criterio Viscoso) che mette in relazione lo schiacciamento toracico con la velocità di deformazione e prevede, in base ai diversi tipi di lesione, varie curve di limite di tollerabilità. Inoltre il criterio

TTI (Thoracic Trauma Index) che si basa sulla media delle accelerazioni massime registrate alla costola superiore o inferiore del manichino e alla base del rachide. Tale indice, che deve risultare inferiore a 90 g affinché esista la sopravvivenza, risulta espresso dalla formula:

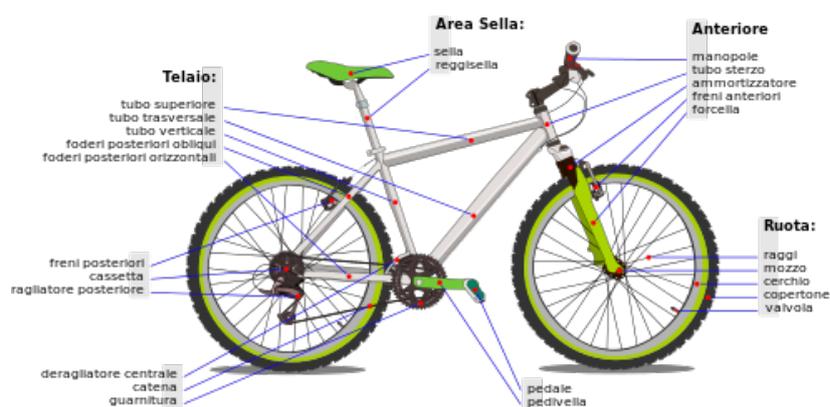
$$TTI = \frac{a_{\max}(\text{rtb}) - a_{\max}(\text{spi})}{2} \quad \text{dove } a_{\max}(\text{rib}) \text{ è la massima accelerazione}$$

misurata in corrispondenza della prima o dell'ultima costola e $a_{\max}(\text{spi})$ quella registrata nella colonna lombare.

Infine, aggiungiamo il criterio dei 3 ms sempre relativo alle lesioni toraciche che prevede il suo baricentro non subire accelerazioni superiori a 60 g per più di 3 ms ed inoltre il criterio di lesione per l'addome che assume un limite di tollerabilità delle accelerazioni in 130 g.

1.3 Sistema di frenatura della bicicletta

Strutturalmente una bicicletta è realizzata da quattro sistemi primari: il telaio, le ruote, il meccanismo di frenata e pedalata con meccanismo a ingranaggi:



Il gruppo ruota di una bicicletta comprende un mozzo, i raggi, il cerchio e lo pneumatico. Il mozzo, che contiene un asse, collega il centro della ruota al telaio della bicicletta e, se la bicicletta ne è equipaggiata, può essere collegato al meccanismo di ingranaggi. I raggi forniscono tensione tra il mozzo ed il cerchio ruota, cerchio che può variare nella sua composizione strutturale, in carbonio o lega di alluminio, e fornisce l'alloggio allo pneumatico. La maggior parte dei moderni pneumatici per bicicletta sono o camera d'aria o tubeless. Se la bicicletta ha uno pneumatico con camera d'aria, la camera d'aria, gonfiata fra lo pneumatico e il cerchio, consente la gomma a rimanere saldamente alloggiata nel cerchio. Gli pneumatici tubeless fanno contatto con il cerchio nei suoi bordi interni e l'aria è pompata direttamente nello spazio esistente tra lo pneumatico ed il cerchio per creare tensione e tenere la ruota sul cerchio. Di solito le biciclette da strada hanno pneumatici più sottili con battistrada minimo in modo che, quando la bicicletta è in movimento, esista una zona di contatto più stretta con la sede stradale utile alle alte velocità. Gli pneumatici da fuori strada sono in genere più ampi con profondità del battistrada più consistente in modo da mantenere una migliore stabilità nel terreno accidentato.

I sistemi frenanti più diffusi sulle biciclette utilizzano un cerchio frenante caratterizzato da un sistema a frizione meccanica che si applica tra una ganasca ed il cerchio ruota. Biciclette da competizione o qualità superiore possono montare dei freni idraulici il cui fluido viene pompato attraverso l'impianto per azionare le ganasce.

1.4 Dinamica nella decelerazione da frenatura della bicicletta

Durante l'azione frenante il peso del ciclista si sposta a caricare la ruota anteriore per cui il più efficace livello di frenata può essere in genere raggiunto utilizzando il freno anteriore e modulando la frenata della ruota posteriore mantenendo, così, la stabilità del mezzo. Uno dei maggiori fattori limitanti l'azione decelerativa della bicicletta è il fenomeno del "pitchover", ribaltamento in avanti, che può causare la proiezione del conducente in avanti sopra il manubrio. Questo si verifica se l'azione frenante sul davanti produce una rapida decelerazione della ruota della bicicletta che crea un momento

attorno alla ruota anteriore. In termini teorici, la velocità di decelerazione alla ruota anteriore deve superare il rapporto tra l'altezza del centro di gravità mezzo-conduttore e il passo della bicicletta se entrambe le ruote sono in contatto con il terreno. L'equazione di base teorica per il calcolo della decelerazione massima di una bicicletta prima di raggiungere la condizione del ribaltamento anteriore è la seguente:

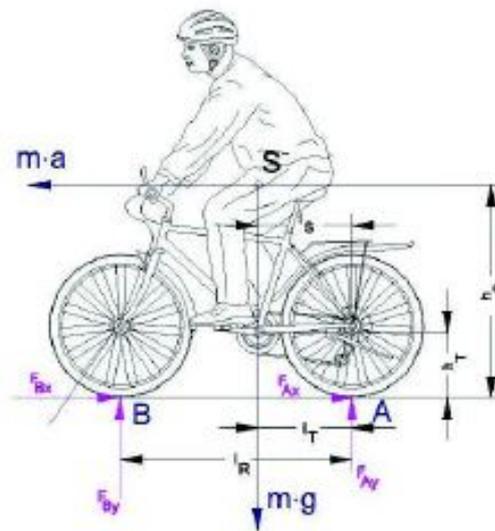
$$a = \frac{\text{altezzacentrogravità}}{\text{passo}}$$

In ogni caso la soglia teorica del pitchover risulta influenzata dalle variabili reali che includono le caratteristiche meccaniche di costruzione e regolazione della bicicletta, la postura del conducente, le dimensioni del suo corpo e la pendenza stradale.

Le soglie del pitchover si verificano in genere per le biciclette ordinarie con normale posizione di seduta del conducente tra lo 0,6 e 0,7 g (fonte Bretting), 0,67 g (fonte Forester) mentre un ciclista può rischiare il ribaltamento anteriore in piano con una posizione accovacciata con un valore di decelerazione iniziale di 0,5 g (fonte Green). Se la decelerazione supera la soglia caratteristica del pitchover tipica per quella bicicletta e guidatore, si verifica la sua proiezione oltre il manubrio e la ruota anteriore. Naturalmente nella decelerazione effettiva gioca un ruolo importante il livello di esperienza del conducente, quello più preparato sposterà il suo peso verso la ruota posteriore tendendo a mantenere il suo centro di massa più basso possibile modulando i freni senza raggiungere il bloccaggio della ruota anteriore mentre quelli meno esperti non potranno ottenere decelerazioni ottimali del mezzo a due ruote. A tale proposito l'efficacia del freno posteriore risulta pari a circa il 75% di quello anteriore con il 90% della forza ritardante che viene, nella maggiore parte delle azioni frenanti, dal freno anteriore.

Durante la frenata si sviluppano forze verticali di contatto sulla ruota anteriore e su quella posteriore, forze che, appunto, sono superiori sulla ruota anteriore. Assumendo come approssimazione il fulcro del sistema

conducente-bicicletta l'area del bacino sovrastante il movimento centrale in prossimità del termine del reggisella:



l'equilibrio del momento nel punto A risulta:

$$m \cdot g \cdot l_s + m \cdot a \cdot h_s = F_{By} \cdot l_R$$

per le forze orizzontali, l'equilibrio delle forze in direzione x risulta:

$$F_{Ax} + F_{Bx} = m \cdot a$$

per l'equilibrio delle forze in direzione y, otteniamo:

$$F_{Ay} + F_{By} = m \cdot g$$

la distribuzione generale di carico sull'anteriore diviene:

$$\% v = \frac{F_{By}}{F_{Ay} + F_{By}} \cdot 100$$

e sul posteriore:

$$\% h = \frac{F_{Ay}}{F_{Ay} + F_{By}} \cdot 100$$

1.5 Parametri della decelerazione da frenatura della bicicletta

Quando si analizza la fase di un urto che può effettuarsi con una varietà di scenari, si procede alla determinazione della velocità, degli spazi dallo stesso percorsi, della cronologia degli eventi, dei fattori causali e dell'evitabilità dell'incidente da parte del ciclista.

L'analista ricostruttore deve quindi approfondire le tematiche legate ai movimenti del mezzo a due ruote, agli spostamenti e ai cambiamenti di moto che dipendono dalla interazione dei due pneumatici della bicicletta e quindi dalle forze scambiate con la superficie stradale (attrito), come le sterzate, cambi di corsia, abordaggio di curve, inversioni di marcia, frenate ed accelerazioni.

Ci proponiamo pertanto di evidenziare quei valori di picco relativi ai coefficienti di attrito tra i pneumatici di bicicletta e le varie superfici quale espressione del rapporto tra la forza di attrito che si sviluppa tra i due corpi e la loro forza complessiva di spinta. Ricordiamo che il coefficiente di attrito è adimensionale, anche se comunemente indicato in termini di g-unità, relativi alla costante gravitazionale e varia in base alle proprietà e consistenza del materiale della sede stradale (l'asfalto, il cemento, la ghiaia con composizione in macrotessiture e microtessiture) oltre alla possibile presenza su di questa di sostanze estranee (l'acqua riduce il coefficiente d'attrito della pavimentazione asciutta di ben il 43% circa).

Il valore di picco dell'attrito disponibile è un concetto importante nella dinamica di un veicolo, lo scorrimento delle ruote aumenta come conseguenza della frenatura e la decelerazione effettiva aumenta sino a raggiungere il valore massimo teorico del coefficiente d'attrito. Tuttavia, una volta raggiunto il pieno bloccaggio delle ruote, il valore del coefficiente di

attrito pneumatico-superficie è in genere inferiore al valore di attrito massimo disponibile. Essendo le biciclette mancanti del sistema ABS, la modulazione della frenata dipende dall'input alla stessa dato dal conducente.

Dalla letteratura si conosce che le biciclette con freni anteriori e posteriori devono essere in grado di arrestarsi nello spazio di 4,6 m circa alla velocità di 24 km/h circa con un conducente del peso compreso in 68-91 kg (United Consumer Product Safety Commission USA) e cioè l'equivalente di una decelerazione media di circa 0,5 g. Altra letteratura suggerisce che un ciclista tipico dovrebbe essere in grado di rallentare con una decelerazione di 0,35 g (Broker e Hill).

I risultati dei test eseguiti dalla American Association of State Highway and Transportation Officials (*AASHTO Guida per lo sviluppo della bicicletta e suoi servizi*, 2012), hanno fornito per le biciclette caratteristiche di attrito ben maggiori degli standard minimi presenti in letteratura e nessun fenomeno di pitchover si è verificato. Infatti i valori di attrito massimo sostenibile da tutti i tipi di pneumatici montati sulle biciclette per tutte le superfici testate, bagnate ed asciutte, ricadono all'interno di un intervallo relativamente ristretto compreso tra un minimo di 0,4 g ad un massimo di 0,66 g. Dalle venti diverse combinazioni di tipo di bicicletta, tipo di superficie e condizioni della superficie testata, si ottiene una decelerazione media pari a 0,52 g:

Test Location	Drag Factor		
	Kona Honky Tonk (road)	Trek 1500 (road)	Trek 6000 (mountain)
Asphalt Driveway 1 - Dry	0.59		
Asphalt Driveway 1 - Wet	0.42		
Asphalt Driveway 2 - Dry	0.49		
Asphalt Driveway 3 - Dry	0.52		
Asphalt Roadway 2 - Dry		0.52	0.57
Asphalt Roadway 2 - Wet		0.49	0.40
Shared Use Path 1 - Dry	0.48		
Shared Use Path 2 - Dry	0.47		
Shared Use Path 3 - Dry	0.5		
Asphalt Parking Lot - Dry	0.54		
Concrete Driveway - Dry		0.63	0.46
Concrete Driveway - Wet		0.52	0.51
Concrete Sidewalk - Dry		0.55	0.66
Concrete Sidewalk - Wet		0.41	0.61

Le variabili o scenari specifici che possono risultare utili all'ingegnere ricostruttore derivati dai test, risultano:

- umido/secco: il valore massimo del coefficiente di attrito medio dello pneumatico della bicicletta su tutte le superfici umide risulta di 0,48 g, mentre di 0,54 g per le superfici asciutte. La presenza di acqua sulla pavimentazione diminuisce il valore massimo del coefficiente di attrito medio nell'ordine dell'11%;

· montagna/strada: il valore massimo del coefficiente di attrito medio dello pneumatico della mountain bike in tutte le condizioni di superficie risulta di 0,54 g, a fronte del valore di 0,51 g rilevato per gli pneumatici della bici da strada. Ciò significa che non si verifica una differenza significativa tra questi diversi tipi di pneumatici nelle varie strade e piste ciclabili;

· bicicletta/autoveicoli: date le differenze di progettazione meccanica del sistema frenante e della composizione strutturale degli pneumatici, è previsto che i valori del coefficiente di attrito degli pneumatici della bicicletta siano meno elevati rispetto a quelli dei veicoli a motore. I test hanno rilevato una gamma di valori del coefficiente di attrito massimo oscillante tra 0,46 g e 0,66 g per biciclette che muovono su superficie asciutta (inferiori del 22% e 34% rispetto ai valori pubblicati relativi a pneumatici di veicoli passeggeri che si muovono su calcestruzzo asciutto o strade asfaltate). Inoltre i test hanno rilevato una gamma del valore massimo del coefficiente di attrito oscillante tra 0,40 g e 0,61 g per biciclette che muovono su superfici bagnate (valori sono inferiori dello 0% e del 13% rispetto ai valori pubblicati relativi agli pneumatici di veicoli passeggeri che si muovono su asfalto o cemento bagnato).

La capacità di accelerazione laterale o longitudinale, utile per l'analisi dei cambi di corsia, per il moto in curva e per le manovre di evitabilità, può essere analizzata nel contesto dell'attrito totale disponibile.

Lo sviluppo nei trasporti dell'utilizzo della bicicletta, prevede la progettazione di impianti con piste ciclabili aventi la pavimentazione con dei

valori di aderenza superficiale superiori rispetto ai percorsi di uso misto, generalmente con valori medi tra 0,70 e 0,80.

Casi studio

2.1 Analisi della trasmissione delle forze durante la frenata

Essendo nota la massa del conducente di 75 kg, la decelerazione di 5 m/s^2 , il passo della bicicletta $l_R = 1 \text{ m}$, la distanza tra il mozzo posteriore e il centro della pedaliera $l_T = 0,40 \text{ m}$ e l'altezza del centro di gravità del sistema $h_s = 1,10 \text{ m}$, per l'equilibrio delle forze di frenata in direzione x abbiamo:

$$F_{Ax} + F_{Bx} = m \cdot a$$

$F_{Ax} = 0$ se non frenato posteriormente

Pertanto

$$F_{Bx} = 100 \text{ kg} \cdot 5 \text{ m/s}^2 = 500 \text{ N}$$

Per le forze verticali (equilibrio in direzione y), abbiamo:

$$F_{By} = \frac{m \cdot g \cdot l_s + m \cdot a \cdot h_s}{l_R} = \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 0,40 + 100 \cdot 5 \cdot 1,10}{1} = 942,40 \text{ N}$$

$$F_{By} = 942,40 \text{ N}$$

$$F_{Ay} = m \cdot g - F_{By} = 100 \cdot 9,81 - 942,40 = 39 \text{ N}$$

quindi per la distribuzione del carico otteniamo:

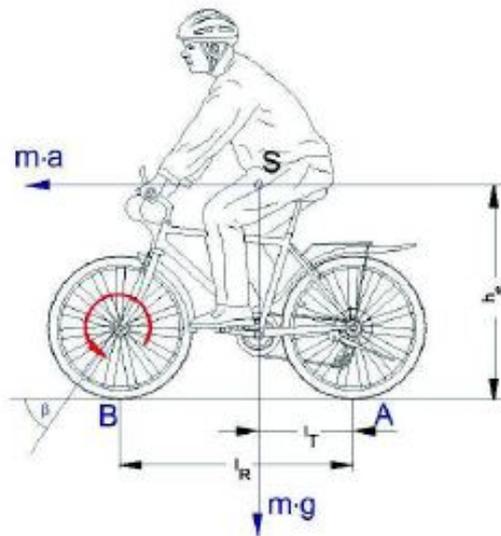
$$\text{per l'anteriore } \%v = \frac{942,40}{942,40+39} \cdot 100 = 96,03\% \text{ e per il posteriore } \%h =$$

3,97% indice che la principale trasmissione di forza durante la frenata si determina sulla ruota anteriore. In caso di forte decelerazione, il sistema tende al ribaltamento a causa della distribuzione non uniforme delle forze di contatto.

2.2 Analisi del ribaltamento

In riferimento al caso studio precedente, è noto che il sistema rimane stabile sino a quando il momento ribaltante M_R diviene maggiore del momento di stabilità M_S e che la stabilità al ribaltamento viene calcolata dal

rapporto $\epsilon = \frac{M_S}{M_R}$:



Essendo:

$$M_S = m \cdot g \cdot (l_R - l_T)$$

$$M_R = m \cdot a \cdot h_S$$

si ricava:

$$\varepsilon = \frac{75 \cdot 9,81 \cdot 0,60}{75 \cdot 5 \cdot 1,10} = 1 \quad \text{ciò significa che il sistema rimane stabile al}$$

ribaltamento sino a quando non intervenga una decelerazione superiore a 5 m/s².

2.3 Analisi della trasmissione delle forze durante il percorso in discesa

Essendo nota la velocità di arrivo all'urto della bicicletta $V = 30 \text{ km/h}$ (o 8,34 m/s), per ricavare la distanza percorsa prima della collisione su strada in pendenza favorevole (discesa) e in partenza da fermo, bisogna tenere conto dell'energia potenziale disponibile per la gravità.

L'energia potenziale quando si pedala in discesa, è ottenuta dal prodotto della massa totale del sistema conducente-bicicletta ($m = 75 + 10 \cong 85 \text{ kg}$) in movimento, dall'accelerazione dovuta alla gravità (g) e dal dislocamento verticale (h), per cui:

$$E_p = - m \cdot g \cdot h$$

Quando l'energia è espressa per unità di distanza su strada (L), si ottiene che l'energia cinetica iniziale è uguale a quella finale più il lavoro delle forze di attrito. Pertanto, posto che $h = L \cdot \sin \alpha$ (ove $\alpha = 2^\circ$ è l'angolo tra il terreno e il piano orizzontale corrispondente alla pendenza stradale misurata nel 3,5% circa) e che $d = K_a$ forza d'attrito per la resistenza del terreno e dell'aria = coefficiente di rotolamento e resistenza al rotolamento per pneumatico tubolare 0,003 + C_r coefficiente di scia e area proiettata su piano frontale 0,3 = 0,303, possiamo ricavare la distanza percorsa sul piano (L), dalla seguente equazione dell'energia potenziale performata contro gravità:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 = m \cdot g \cdot h + d \cdot m \cdot g \cdot \cos 2^\circ \cdot L$$

per cui

$$L = \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot (\sin^2 \alpha + d \cdot \cos^2 \alpha)} = \frac{8,34^2}{2 \cdot 9,81 \cdot (\sin^2 2^\circ + 0,303 \cdot \cos^2 2^\circ)} = 10,50 \text{ m}$$

Studio sperimentale

3.1 Prova d'impatto ciclista contro autovettura

Da recenti prove sperimentali eseguite dal Politecnico di Milano (Laboratorio per la Sicurezza dei Trasporti) su diverse configurazioni di impatto molto frequenti in ambito urbano tra la bicicletta e l'autovettura, è stato possibile validare dei modelli numerici ad elementi finiti di bicicletta e ciclista con finalità di utilizzo per la valutazione delle accelerazioni e dei criteri di lesività degli occupanti.

Tramite un software a elementi finiti (LS-Dyna), i tecnici del LAST hanno definito il modello numerico nei dettagli in comparazione ai dati forniti da prove sperimentali effettuate su modello di bicicletta con manichino strumentato. La modellazione a elementi finiti della bicicletta, derivata da uno studio statistico, ha previsto un modello a travi (con telaio comprensivo di forcella, manubrio e pedaliera) e uno a piastre. Il modello a travi è stato definito partendo da un disegno di telaio comprensivo di forcella, manubrio e pedaliera. Dal disegno del modello si è passati poi alla sua suddivisione in "elementi finiti" (mesh) e alla caratterizzazione dei materiali. Di altrettanta importanza è stata la definizione di giunzioni e cinematismi tra i vari componenti. Il modello "a shell" invece è stato suddiviso in elementi finiti partendo da un modello già disegnato di bicicletta da città, di cui si disponeva un modello CAD. Con le stesse modalità è stato necessario definire i materiali e le caratteristiche dei cinematismi affinché si muovessero in maniera realistica. Sono state eseguite quattro prove di crash con lo stesso procedimento e strumentazione, ottenendo misurazioni analoghe e

conservative, in varie configurazioni bicicletta-manichino contro una Alfa Romeo 33 SW in impatto frontale e laterale a diverse velocità della bicicletta:

PROVA	ZONA D'IMPATTO	VELOCITA' Km/h	PRESSIONE bar
1	Laterale, lato conducente	10	3.8
2	Laterale, lato conducente	40÷45	6
3	Frontale	37÷39	5.5
4	Laterale, lato passeggero	25	5

Dalla validazione dei modelli numerici sviluppati, si evidenzia come il loro utilizzo possa essere efficace per la valutazione delle accelerazioni e dei criteri di lesività degli occupanti per studiare un maggior numero di incidenti stradali, tenuto conto che la risposta agli impatti del modello numerico rispecchia bene il comportamento del modello sperimentale il quale può divenire un importante sostituto. In particolare i dati forniti dalle prove sperimentali in tabella, mettono in evidenza una condizione sostanziale e cioè mentre i manichini non hanno riportato danni considerevoli, quali indice di conseguenze lesive gravi o addirittura mortali del corpo umano, le entità dei criteri di interesse e le accelerazioni massime raggiunte sono risultate relativamente basse. Questa condizione indica la necessità di accordare le misurazioni quantitative (accelerazioni, criteri di lesione), sia ad osservazioni qualitative dello stato fisico dei soggetti coinvolti, sia ad indagini medico legali accurate.

Bibliografia

1. Istat, Incidenti Stradali
2. Eubenks, J. And Hill, P., Bicycle Accidents Biomechanical, Engineering and Legal Aspect, Lawyers and Judge (2006), Tucson, Arizona
3. Bretting, G., Analysis of Bicycle Pitch-Over in a Controlled Environment, SAE technical paper 2010-01-0064 (2010)
4. Paper EVU 2013 - 22
5. Whitt, Frank Rowl and David Gordon Wilson, "Bicycling Science" (Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1994)
6. La.S.T. – Politecnico Milano – 4.11.17