

XXII Convegno Nazionale Stradale

Titolo: DISTRIBUZIONE AREALE DI VELI IDRICI SU PIANI STRADALI

Autori: L. Domenichini*, L.Cera**

* Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, Università Roma "La Sapienza"

** Ingegnere

Premessa

La guida su una superficie stradale coperta da uno velo d'acqua puo' diventare insicura. Anche per un giudatore esperto ed attento, in queste condizioni, soprattutto se ad elevata velocita', puo' risultare molto difficile controllare il veicolo quando l'aderenza disponibile al contatto pneumatico - pavimentazione si riduce a valori inferiori a quelli necessari per l'equilibrio del veicolo durante la manovra effettuata, ed in special modo quando si determina il completo distacco tra pneumatico e pavimentazione (fenomeno dell'idroportanza).

L'approfondimento pertanto del rapporto esistente, sia in fase progettuale, che, e soprattutto, in fase di esercizio, tra geometria stradale (andamento planoaltimetrico del tracciato, assetto della sezione trasversale, regolarità superficiale) e condizioni di drenaggio dell'acqua meteorica sulla superficie stradale risulta essenziale per individuare aree di intervento per un possibile incremento della sicurezza stradale, sia in ambito normativo che in fase manutentiva.

A tale scopo, nell'ambito del Piano Finalizzato Trasporti 2 del CNR, è stata avviata una ricerca volta ad individuare le relazioni intercorrenti tra sicurezza stradale e condizioni superficiali delle pavimentazioni. Il presente rapporto si inquadra nella fase iniziale di tale ricerca ed analizza il significato delle disposizioni normative esistenti in materia di andamento dei cigli della carreggiata stradale con riferimento al rischio potenziale di perdita di aderenza a seguito dell'insorgere di fenomeni di idroportanza.

Impostazione generale della problematica

La ricerca, finanziata nell'ambito del CNR/PFT2, si articola secondo il diagramma concettuale riportato in figura 1.

Dopo l'esame iniziale della letteratura tecnica riguardante il rapporto tra caratteristiche superficiali delle pavimentazioni e sicurezza, si è affrontato l'aspetto riguardante l'individuazione delle variabili che intervengono nel definire le condizioni di equilibrio di un veicolo che percorre un generico tracciato stradale e che influenzano il fenomeno dell'interazione tra veicolo e pavimentazione.

La parte più importante, e per certi versi ancora non del tutto risolta, riguarda la modellazione del moto di un veicolo sulla superficie stradale che, nell'impostazione più generale del problema, si presenta come una superficie sghemba nello spazio, deformata dall'uso e dagli agenti atmosferici, sulla quale si formano, in relazione all'entità istantanea delle precipitazioni meteoriche ed alle condizioni di deflusso dell'acqua, veli idrici di spessore e distribuzione areale variabili nello spazio e nel tempo. Per risolvere tale problematica nella fase iniziale di approfondimento, si è ricorso a schematizzazioni semplificate della realtà. In tal senso, con le informazioni ed i dati disponibili, è possibile mettere a punto una serie di modelli riguardanti, separatamente :

- il fenomeno dell'aderenza pneumatico - pavimentazione, con riferimento alle principali variabili da cui essa può dipendere;
- il fenomeno dell'idroportanza che, in ultima analisi, riguarda l'applicazione del modello dell'aderenza a situazioni di presenza sulla pavimentazione di veli idrici di rilevante spessore;
- il fenomeno della distribuzione areale dei veli idrici sulla pavimentazione in funzione delle caratteristiche geometriche del tracciato e dell'intensità di pioggia. Il riferimento a condizioni di superficie deformata dall'uso costituirà una fase successiva di approfondimento;

- la caratterizzazione cinematica e dinamica del moto del veicolo in condizioni di parziale o totale assenza di aderenza, per valutare le conseguenze che situazioni più o meno estese di zone di pavimentazione interessate da spessori di veli idrici potenzialmente pericolosi (in relazione alla velocità di percorrenza) possono avere sul controllo direzionale del veicolo.

L'insieme di questi modelli, sviluppati in forma automatica, potrà formare il corpo di un modello complesso di simulazione attraverso il quale analizzare tutta una serie di situazioni progettuali o reali per caratterizzarle dal punto di vista della sicurezza e per individuare eventuali azioni correttive.

Deflusso delle acque nelle zone di transizione

L'impostazione analitica del problema riguardante la valutazione delle condizioni di deflusso dell'acqua meteorica sul piano stradale e del calcolo dello spessore dei veli idrici presenti e della loro distribuzione areale ha preso le mosse dai risultati della esperienza condotta da N.F. Ross e K. Russam [1] sul moto dell'acqua su falde piane, caratterizzate da una pendenza costante, in presenza di pioggia.

La formulazione sperimentale proposta da Ross e Russam mette in relazione lo spessore del velo idrico (d) con la lunghezza di drenaggio (L), l'intensità di pioggia (I) e la pendenza della linea di drenaggio (N) attraverso la relazione:

$$d = 0.015 \times (L * I)^{1/2} / (N)^{1/5} \quad (1)$$

Detta relazione è stata successivamente modificata per renderla idonea a descrivere il caso più generale di deflusso dell'acqua su superfici caratterizzate da pendenze variabili da punto a punto, giungendo alla formulazione [2]:

$$d_2^2 = d_1^2 (b_1/b_2)(S_1/S_2)^{0.4} + [(b_1 + b_2) / 2b_2](cL_2) / (0.015^2 S_2^{0.4}) \quad (2)$$

in cui:

$d_{1,2}$ è lo spessore efficace del velo idrico nelle sezioni generiche 1 e 2 (cm);

$b_{1,2}$ è la larghezza del tubo di flusso nelle sezioni generiche 1 e 2 (cm);

S è la pendenza dei tratti 1 e 2 consecutivi della falda

L_2 è la larghezza del tratto di falda all'estremo del quale si valuta lo spessore del velo idrico (m)

c è il coefficiente di deflusso

I è l'intensità di pioggia (cm/ora).

Per estendere l'analisi ad un numero consistente di casi e' risultato necessario sviluppare una procedura di calcolo automatica attraverso la quale, al variare delle caratteristiche geometriche del tratto stradale in esame, (raggi di curvatura, parametri delle linee clotoidiche, composizione della sezione trasversale), delle pendenze trasversali e longitudinali, della legge di rotazione della sagoma e dell'intensita' di pioggia, fosse possibile determinare:

- le curve di livello del piano stradale;
- le linee di corrente o di flusso;
- le isolinee dello spessore del velo idrico.

Determinazione delle linee di corrente nelle zone di transizione

Preliminare all' applicazione della formula di Ross e Russam e' la determinazione dell'andamento delle linee di corrente (o di flusso) e della loro lunghezza.

Lo studio effettuato a tal proposito ha preso spunto da un lavoro presentato da Y. Decoene nel 1981 [2], nel quale l' autore ha proposto una soluzione in forma chiusa del problema della determinazione delle linee di flusso nel caso di rotazione della sagoma lungo un rettilineo con pendenza longitudinale costante diversa da zero.

In tale studio viene trascurata la pendenza longitudinale del ciglio esterno dovuta alla rotazione della sagoma e non puo' essere esaminata la situazione di pendenza longitudinale nulla; si e' pertanto provveduto a generalizzare, secondo quanto illustrato nel seguito, l'originale formulazione di Decoene per poterla applicare alle zone di transizione stradali nelle quali la sagoma ruota per passare dalla configurazione che essa ha, per esempio, in rettilineo a quella che le compete nel tratto circolare della curva.

Il problema viene analizzato in un sistema di riferimento cartesiano (fig. 2) avente origine degli assi nel punto in cui, per effetto della rotazione della sagoma la pendenza trasversale assume il valore nullo e il cui asse delle ascisse è posto tangente al ciglio esterno con verso positivo nel senso crescente delle progressive.

La superficie viabile viene considerata per ipotesi, in questo primo approccio, piana ed indeformata.

Con riferimento alla figura 3, ciascun punto di coordinate (x_i, y_i) e' caratterizzato da una pendenza longitudinale $\text{tg } \delta_i$, data dalla somma della pendenza longitudinale della livelletta $\text{tg } \delta_0$ e dal contributo $\text{tg } \delta_{ci}$ portato nel punto i e della pendenza longitudinale del ciglio della carreggiata ed una pendenza trasversale $\text{tg } \alpha_i$

I valori delle due grandezze $\text{tg } \delta_{ci}$ e $\text{tg } \alpha_i$ sono forniti dalle relazioni:

$$\operatorname{tg} \delta_{ci} = \frac{(B - y_i)}{L} * \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i = (x_i/L) \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (4)$$

in cui $\operatorname{tg} \alpha_0$ è il valore iniziale della pendenza trasversale, L è lo sviluppo di strada tra progressiva in cui $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_0$ e quella in cui $\operatorname{tg} \alpha = 0$ e B è la larghezza della carreggiata.

Nel punto generico "i" della linea di corrente sussiste la relazione generale:

$$dy = \operatorname{tg} \gamma_i dx \quad (5)$$

Il valore della grandezza $\operatorname{tg} \gamma_i$ è fornito, tenendo conto anche della (3) e della (4) dalla relazione:

$$\operatorname{tg} \gamma_i = \frac{\operatorname{tg} \alpha_i}{\operatorname{tg} \delta_0 + \operatorname{tg} \delta_{ci}} = \frac{x_i}{\Lambda + B - y_i} \quad (6)$$

avendo posto:

$$\Lambda = \frac{L \operatorname{tg} \delta_0}{\operatorname{tg} \alpha_0}$$

Pertanto, sostituendo ed integrando, nell'ipotesi di pendenza longitudinale $\operatorname{tg} \delta_0$ costante, si ottiene:

$$(\Lambda + B) * y_i - \frac{y_i^2}{2} = \frac{x_i^2}{2} + C \quad (7)$$

La costante di integrazione \hat{C} si ricava ponendo :

$$\begin{cases} x_i = 0 \\ y_i = B_i \end{cases}$$

essendo B_i l'ordinata del punto di intersezione della curva di flusso passante per il punto i -esimo, con l'asse delle y (fig. 3), da cui:

$$C = (A+B) * B_i - \frac{B_i^2}{2} \quad (8)$$

In conclusione l'espressione che descrive in forma esplicita la curva di deflusso generica è data dalla:

$$x = \pm \sqrt{y^2 - 2(A+B) * y + 2(A+B) * B_i - B_i^2} \quad (9)$$

Calcolo della distribuzione areale dei veli idrici

La determinazione dello spessore del velo idrico su piani viabili in zone di transizione con pendenza longitudinale costante, è stata messa a punto una procedura di calcolo automatica, organizzata secondo il diagramma di flusso di figura 4.

La procedura determina, per date caratteristiche plano-altimetriche del tratto stradale in esame e per definita legge di rotazione della sagoma ed intensità di pioggia, la planimetria a curve di livello della pavimentazione, l'andamento delle linne di corrente (che saranno sempre perpendicolari alle curve di livello) e l'andamento delle isolinee di spessore del velo idrico. Quest'ultimo è calcolato mediante la (1) nella quale il termine L viene determinato mediante la (9). la procedura pertanto trascura gli effetti prodotti dalla convergenza o divergenza delle linne di corrente cosa di cui invece tiene conto la (2), e conduce quindi a risultati quanto più attendibili quanto maggiore è la pendenza longitudinale.

Con riferimento ad una strada di tipo IIa, secondo le vigenti norme CNR, con larghezza di piattaforma 10.5 m ed un tratto di transizione tra rettilineo e curva circolare (di raggio 1100 m), di tipo clotoidico di parametro $\Lambda=400$, si sono esaminate un certo numero di situazioni caratterizzate da pendenze longitudinali della liveletta variabili tra 0.0% e 5.0%.

La rotazione della sagoma per il passaggio dalla sezione trasversale in rettilineo a quella in curva è eseguita lungo il tratto clotoidico, assumendo quale asse di rotazione il ciglio della piattaforma adiacente allo spartitraffico.

Sono stati esaminati due casi; nel primo la sagoma viene fatta variare rispettando la Norma CNR che prevede una accentuazione iniziale della velocità di rotazione attraverso l'imposizione di una pendenza longitudinale minima del ciglio esterno pari a $(0,1 * B) = 1,05 \%$.

Nel secondo caso la velocità di rotazione della sagoma è quella che deriva dall'imporre una pendenza longitudinale costante per il ciglio esterno pari a $(\Delta h/l)*100$ in cui Δh è la variazione di quota del ciglio tra il tratto in rettilineo e la curva circolare (di pendenza trasversale assunta pari al 4%) ed l è la lunghezza della clotoide. Nel caso esaminato tale pendenza assume il valore di 0.47%.

Per quanto riguarda infine l'intensità di pioggia, i calcoli sono stati sviluppati per tre valori ($I = 50, 100$ e 200 mm/h) rappresentanti situazioni di pioggia da poco a molto intensa.

I risultati dei calcoli vengono rappresentati in forma grafica come illustrato nella figura 5, riferita al caso di un tratto con pendenza longitudinale pari al 2% e in presenza di una pioggia di intensità di 100 mm/h. I due casi illustrati in fig.5 si riferiscono al caso di rotazione della sagoma secondo le prescrizioni della normativa CNR 78/80 (caso 21S) ed al caso di rotazione in deroga a detta norma (caso 21N).

Analisi dei risultati

L'applicazione del modello di calcolo ai casi descritti ha permesso di evidenziare, nelle zone di transizione tra curve planimetriche, la

variabilità della perimetrazione, dell'area nella quale si ha la formazione di veli idrici di particolare consistenza, potenzialmente critici ai fini dell'insorgere del problema della perdita di aderenza.

I risultati delle numerosissime ricerche effettuate al proposito dimostrano la consistente riduzione del valore del coefficiente di aderenza "fa" che si manifesta per valori crescenti dello spessore del velo idrico ed evidenziano che, in corrispondenza di una velocità limite, variabile al variare dello spessore del velo idrico e delle condizioni di usura dei pneumatici, si può manifestare la perdita totale di aderenza (fenomeno dell'aquaplaning). I dati riportati in tabella 1, riferiti ad esperienze americane [4] illustrano con chiarezza quest'ultimo aspetto.

TABELLA 1: Spessore critico del velo idrico per l'insorgere dell'aquaplaning.

Velocità (Km/h)	Condizioni del pneumatico		
	Nuovo	Mediamente consumato.	Liscio
80	7,8	4,7	2,6
100	5,0	3,0	1,7
120	3,5	2,0	1,2
130	3,0	1,8	1,0

Nel caso di pneumatici con battistrada mediamente consumati e per una velocità di 100 km/h, quale è quella di percorrenza del tratto stradale esaminato, lo spessore critico del velo idrico ai fini dell'insorgere del fenomeno dell'aquaplaning può essere individuato in 3 mm.

Con riferimento a tale valore limite, dalla figura 5 si può notare che il dispositivo normativo è in grado di ridurre considerevolmente

l'estensione dell'area critica, interessata cioè da spessori di velo idrico superiori a 3 mm, ma non consente di eliminare il problema. Inoltre il valore massimo raggiunto dallo spessore del velo idrico (7 mm) è ben al di sopra del valore critico, anche nella soluzione rispettosa della norma CNR.

Individuando in tutti i casi esaminati, l'estensione dell'area critica, è stato possibile calcolare:

- l'estensione della superficie soggetta a veli idrici di spessore ≥ 3 mm, espressa sia in valore assoluto, sia in percentuale rispetto allo sviluppo di strada esaminato;
- lo sviluppo longitudinale del piano stradale interessato da veli idrici di spessore ≥ 3 mm misurato in corrispondenza della traiettoria percorsa dal pneumatico destro dei veicoli transitanti nella corsia di sorpasso.

I valori numerici assunti da tali indici nei diversi casi esaminati sono rappresentati nei grafici delle figure 7 e 8, nelle quali con le lettere A, B e C sono state individuate le curve relative a intensità di pioggia rispettivamente di 200 mm/h, 100 mm/h e 50 mm/h.

Le curve con linea continua si riferiscono ai casi in cui la variazione dei cigli è eseguita in accordo con la normativa CNR mentre quelle tratteggiate si riferiscono ai casi fuori norma.

La figura 7 riporta l'estensione delle superfici, escluse le banchine, soggette a potenziale fenomeno di aquaplaning nella carreggiata di destra (in cui pendenza trasversale varia tra - 2,5% e + 4%). Da questa si nota chiaramente che tutti i casi esaminati presentano situazioni critiche, la cui gravità aumenta all'aumentare della pendenza e dell'intensità di pioggia. Per piogge particolarmente intense di breve durata, individuate da una intensità di 200 mm/h, in assenza di pendenza longitudinale, la zona critica investe il 50% della carreggiata percorsa dai veicoli; tale valore sale al 90% nel caso di pendenza longitudinale pari ai valori massimi ammessi dalle norme. Nei casi di pioggia molto intensa il dispositivo normativo del CNR risulta

praticamente privo di utilità pratica. Per valori più limitati dell'intensità di pioggia la procedura di rotazione della sagoma prevista dalla normativa CNR è in grado di ridurre il fenomeno con efficacia crescente al ridursi dell'intensità.

La figura 8 riporta invece lo sviluppo longitudinale delle zone potenzialmente interessate dal fenomeno dell' aquaplaning nella corsia di sorpasso della carreggiata destra. Come si può notare, le prescrizioni di norma risultano efficaci soltanto per pendenze longitudinali minime. In questi casi lo sviluppo della traiettoria potenzialmente critica viene contenuto in qualche decina di metri, e ciò consente, con buona probabilità, di superare di slancio la zona critica. Se la pendenza longitudinale aumenta, invece, la gravità della situazione aumenta; il fenomeno può giungere a interessare sviluppi di 100 e più metri, con punte massime, nei casi esaminati, di 150 m in presenza di piogge molto intense. Questi ultimi valori possono condurre un veicolo a perdere il controllo direzionale, nè le prescrizioni di norma riescono ad essere particolarmente efficaci.

Conclusioni

Lo studio effettuato, prendendo le mosse da un'ampia ricerca bibliografica sul problema dell'aderenza pneumatico- pavimentazione e sui rapporti intercorrenti tra questo e la sicurezza stradale, ha evidenziato l'esistenza di un ambito suscettibile di interessanti approfondimenti della riduzione del rischio di incidenti per perdita di aderenza su superficie bagnata.

Un aspetto certamente importante riguarda la risoluzione, dal punto di vista geometrico e tecnologico, delle situazioni di transizione tra elementi del tracciato a curvatura costante ed opposta nelle quali, per effetto delle limitate ed anche nulle pendenze trasversali (pur nel rispetto della normativa CNR vigente), si manifesta un accumulo di acqua, con spessori di velo idrico potenzialmente in grado di innescare, in relazione all'intensità della pioggia ed alla velocità dei veicoli,

condizioni di perdita' completa di aderenza in conseguenza dell'istaurarsi del fenomeno dell'idroportanza dinamica.

E' stato pertanto messo a punto un modello di calcolo per la determinazione della distribuzione areale dello spessore del velo idrico sulla pavimentazione in zone di transizione. Ovviamente il modello messo a punto necessita di una validazione sperimentale che ci si ripropone di effettuare nella fase successiva di sviluppo del programma di ricerca.

L'individuazione e la perimetrazione delle aree potenzialmente pericolose ai fini del fenomeno dell'aquaplaning può, in ultima analisi, consentire di attuare razionalmente quelle soluzioni ostative, di natura attiva, che la tecnica rende al giorno d'oggi disponibili. Trattasi, per esempio, dell'impegno mirato di provvedimenti quali l'assolcatura trasversale dei manti ovvero l'utilizzo di manti porosi drenanti, caratterizzati da elevata infiltrabilità, eventualmente associati a sistemi ipogei drenanti.

L'impiego del modello di calcolo ha permesso di sottoporre ad una verifica funzionale il dispositivo normativo vigente e può essere preso in considerazione per evidenziare l'eventuale esigenza di una revisione dello stesso.

Nel prosieguo della ricerca si intende modificare il modello messo a punto per estenderne l'applicabilità a casi più complessi, quali quelli di tratti stradali caratterizzati da pendenze longitudinali comunque variabili. L'obiettivo finale è quello di rendere il modello in grado di risolvere il caso di superfici stradali in esercizio, deformate dall'uso e dagli agenti atmosferici.

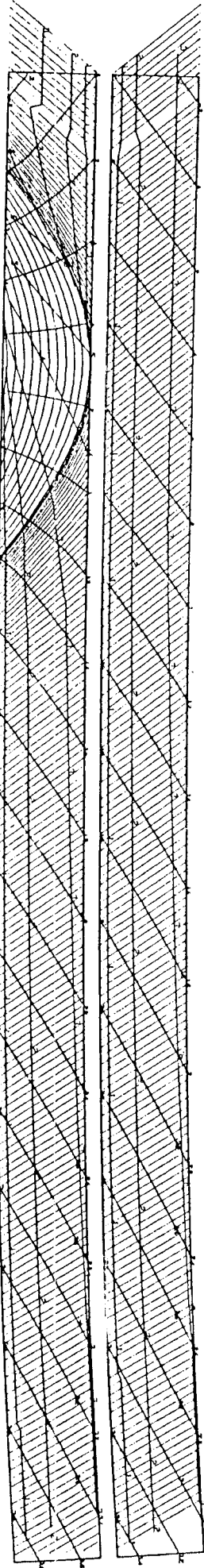
Tale auspicato risultato potrà consentire di mettere a punto una procedura di collaudo della sicurezza stradale nei riguardi dell'aderenza e di individuare le condizioni limiti ammissibili oltre le quali, per evitare l'innescare di pericolose situazioni di aquaplaning, è necessario programmare interventi correttivi.

Riferimenti bibliografici

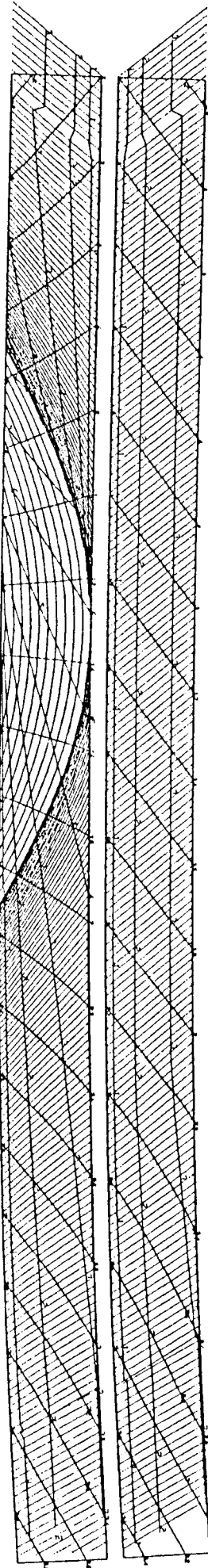
- [1] N.F. Ross, K. Russam, "The Depth of Rain Water on Road Surface", Road Research Laboratory , Ministry of Transport. RRL Report LR 236,1968
- [2] L.Domenichini, G. Remedia, "Condizioni di deflusso su piani stradali in zone di transizione" 23^ Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche1992
- [3] Y. Decoene , "Traitment de changements de devere presentant una stagnation d'Eau" , XV Congres Belge de la Route, Hasselt , 1981
- [4] B.M. Gallaway, et al "Tentative Pavement and Geometric Design Criteria for Minimizing Hydroplaning", FHWA - RD - 75 - 11, 1975

5
FIGURA 6:

21S



21N



used