

REGOLAZIONI SEMAFORICHE: METODOLOGIE CNR ('92) ED HCM ('94) A CONFRONTO

Sascia Canale ⁽¹⁾

Salvatore Leonardi ⁽²⁾

Maurizia Barone ⁽³⁾

1.Premesse.

La progettazione di un impianto semaforico costituisce un'operazione potenzialmente complessa, che deve basarsi su specifiche conoscenze della circolazione stradale, in termini di origine e destinazione ed in considerazione della reale quantificazione dei flussi veicolari. Si richiede, inoltre, l'utilizzo di metodologie di progetto adeguate a mettere in conto la molteplicità di parametri entranti in gioco nella articolata realtà delle condizioni della viabilità urbana.

In Italia, le "Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane" del CNR (B.U. 150, 15/12/1992), propongono una procedura per il progetto delle regolazioni semaforiche, la quale, in questo studio, si vuole mettere a confronto con il metodo di progettazione e verifica, contenuto nel capitolo 9 dell'Highway Capacity Manual (Ottobre 1994).

In particolare, l'obiettivo della presente trattazione è quello di mettere in evidenza come la metodologia proposta dall'HCM costituisca uno strumento flessibile e, soprattutto, maggiormente adeguato, rispetto alle direttive consigliate dal CNR, a descrivere le condizioni di viabilità delle intersezioni semaforizzate tipiche della realtà italiana.

Osserviamo infine che, per il perseguimento dell'obiettivo appena enunciato, si è scelto di attingere a dati ricavati direttamente da indagini "in loco", effettuate in corrispondenza di un'intersezione semaforizzata appartenente ad un'infrastruttura, la circonvallazione Nord, inserita nel tessuto urbano della città di Catania.

⁽¹⁾ Professore associato di "Costruzioni di Strade Ferrovie ed Aeroporti" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Catania.

⁽²⁾ Dottorando di ricerca in "Riqualificazione e potenziamento della rete stradale" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Catania.

⁽³⁾ Ingegnere, collaboratrice volontaria all'attività di ricerca presso l'Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell'Università degli Studi di Catania.

2. Il calcolo del ciclo semaforico.

L'Highway Capacity Manual propone un livello di verifica ed uno di progettazione delle regolazioni semaforiche.

L'analisi di verifica viene realizzata utilizzando informazioni dettagliate riguardanti le caratteristiche geometriche, di traffico e di semaforizzazione delle intersezioni. Tali dati possono essere ricavati da casi esistenti (in questo caso sono dati oggettivi e inequivocabili), o ipotizzati per situazioni future (in questa situazione, invece, il progettista deve far riferimento alle condizioni più probabili in cui si può venire a trovare l'intersezione in futuro).

Un concetto molto importante espresso dal manuale americano è che, mentre per la stesura dell'analisi di verifica sono necessari accurati e attendibili dati di ingresso, nel *metodo di progettazione* tale scrupolosità viene richiesta non tanto ai dati d'ingresso quanto alle procedure computazionali.

Il manuale fornisce la seguente formula per il calcolo della lunghezza del ciclo semaforico:

$$C = \frac{TL}{1 - \left[\frac{\text{Min}(CS, RS)}{RS} \right]} \quad (1)$$

dove:

- TL è il tempo totale perso per ciclo;
- CS è la somma critica dei volumi di fase (è il volume, o somma di volumi, che per un certo ramo richiede il massimo utilizzo dell'intersezione);
- RS è la somma di riferimento dei volumi di fase.

Dall'analisi della (1) si evince facilmente che il calcolo del ciclo semaforico secondo l'HCM è una procedura che si fonda su dati rilevabili in situ e che, pertanto, non devono essere ipotizzati dal progettista.

La normativa italiana, invece, non distinguendo i due diversi livelli (di progetto e di verifica), prospetta una valutazione del ciclo semaforico che lascia fin troppo spazio ad aleatorietà ed a interpretazioni soggettive del progettista. Il CNR consiglia, per il calcolo del ciclo semaforico, di adottare la formula del ciclo teorico:

$$C = \frac{L}{1 - Y} \quad (\text{secondi}) \quad (2)$$

dove:

- C è la lunghezza del ciclo (s);

- L è la somma dei perditempi durante un ciclo (s);
- Y è la somma degli indici di carico delle singole fasi veicolari.

Il numeratore, L, della (2) è calcolato come:

$$L = P + \sum_{i=1}^{\Phi} (l_i) \quad (\text{secondi}) \quad (3)$$

dove:

- ◆ P è la durata (s) della fase esclusivamente pedonale eventualmente presente;
- ◆ Φ è il numero delle fasi semaforiche;
- ◆ l_i è il perditempo (s) della i-esima fase.

Sono da considerare perditempo (l_i) di ogni fase semaforica:

- l'avviamento alla partenza, in altre parole il tempo che si perde per l'avviamento al comparire del verde, da assumere pari a 3 secondi;
- metà del tempo di giallo (da assumere costante pari a 4 secondi) non utilizzato per il deflusso, pari a 2 secondi;
- dove è presente, il tempo di tutto rosso (TR_i), espresso in secondi: si tratta dell'intervallo di tempo durante il quale permane il segnale di rosso per tutte le direzioni, da adottare tra una fase e l'altra per garantire lo sgombero dell'intersezione o di quella parte di essa interessata dalle traiettorie delle correnti di traffico che si muovono nella successiva fase semaforica.

Quest'ultimo parametro (TR_i) può essere valutato con la seguente relazione:

$$TR_i = t_{dp} + \frac{S_f}{V_A} + \frac{D + d}{V_V} - t_g \quad (\text{secondi}) \quad (4)$$

dove:

t_{dp} è il tempo di percezione e decisione, pari a 1 secondo;

V_A è la velocità (km/h) dei veicoli in arrivo, da porre pari alla velocità di progetto della strada o al limite di velocità imposto;

d è la lunghezza media dei veicoli, assunta in genere pari a 5 metri;

D è la lunghezza della traiettoria (metri), all'interno dell'intersezione, della corrente più vincolante in termini di tempo di sgombero dell'intersezione medesima;

V_V è la velocità dei veicoli (km/h) della corrente più vincolante, all'interno dell'intersezione, da valutare di volta in volta in ragione delle traiettorie dei veicoli;

t_g è la durata (s) del tempo di giallo;

S_f è lo spazio di frenatura, calcolato con la seguente formula (cfr. § 3.1 delle “Norme sulla caratteristiche geometriche delle strade extraurbane” -CNR, B.U. N° 78 - 28/7/80):

$$S_f = \frac{V_A^2}{2 \cdot g \cdot \left(f_a \pm \frac{i}{100} \right)} \quad (\text{metri}) \quad (5)$$

dove:

- ◆ g è l’accelerazione di gravità, pari a 9.81 m/s^2 ;
- ◆ f_a è il coefficiente di aderenza, funzione della velocità V_A (km/h) di arrivo dei veicoli;
- ◆ i è la pendenza del ramo (%), positiva per il ramo in salita verso l’intersezione, negativa nel caso contrario.

Il tempo di tutto rosso è, senza dubbio, un parametro importante per il calcolo del perditempo e dunque del ciclo semaforico, soprattutto nella realtà italiana dove spesso il giallo viene usato per occupare l’intersezione invece che per liberarla. In questa situazione la presenza del tempo di tutto rosso garantisce una maggiore sicurezza per l’utente, il quale, anche usando una parte di giallo per occupare l’incrocio, libererà l’intersezione mentre sugli altri rami di accesso è scattato il rosso.

Nell’ambito della procedura di valutazione del tempo di tutto rosso, occorre rivedere criticamente alcuni parametri entranti in gioco.

Il primo concetto su cui si intende porre particolare attenzione è quello di “corrente più vincolante”, in termini di tempo di sgombero dell’intersezione.

Se la svolta a sinistra è una manovra autorizzata, questa nella maggior parte dei casi individuerà la corrente più vincolante durante la fase. Quando invece tale manovra non è consentita, risulta molto difficile individuare il flusso veicolare maggiormente vincolante in termini di sgombero dell’intersezione. In particolare potrebbero verificarsi due condizioni particolari, l’una “complementare” all’altra:

- 1) una volta individuata la corrente più vincolante in base alle caratteristiche geometriche, possono intervenire condizioni di traffico che ne alterano la determinazione, favorendo magari correnti veicolari che, se pur sfavorite dalle condizioni geometriche, sono agevolate da un basso flusso di traffico;
- 2) determinata la corrente più vincolante in funzione delle caratteristiche di traffico, potrebbe subentrare la conformazione geometrica dell’intersezione ad inficiare la validità di tale determinazione.

Ne deriva, quindi, che sia la velocità (V_V) che la lunghezza (D) della traiettoria della corrente più vincolante non possono essere individuate univocamente, in quanto variabili in funzione delle condizioni geometriche e di traffico che di volta in volta si hanno sull'intersezione.

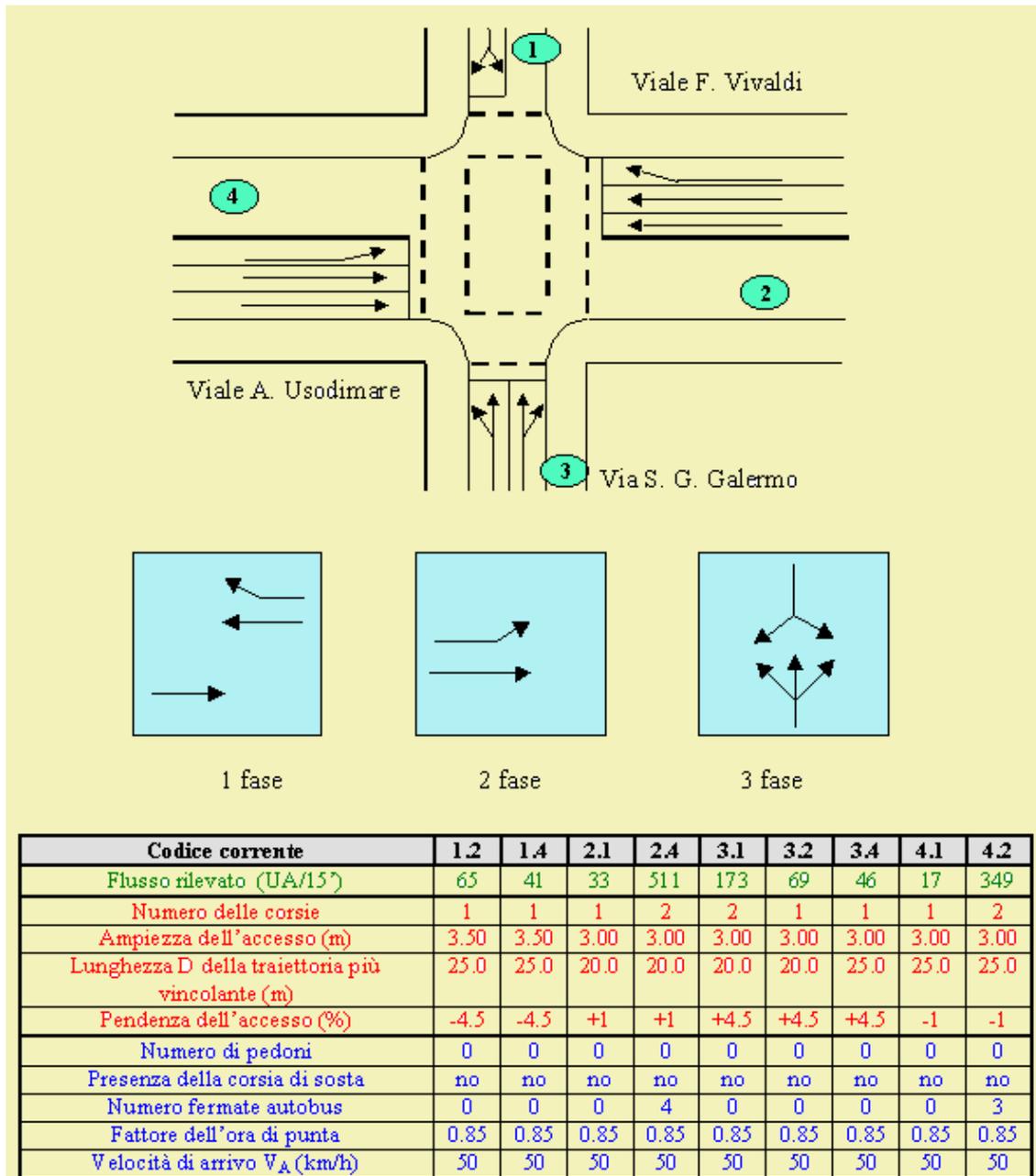


Figura 1: Schematizzazione delle caratteristiche geometriche e delle condizioni di semaforizzazione e di traffico relative all'intersezione analizzata.

L'analisi di una situazione reale, l'intersezione semaforizzata tra la circonvallazione nord di Catania e due strade ad essa ortogonali (figura 1), ha consentito la realizzazione del

grafico riportato in figura 2. Tale grafico mette in evidenza che la variabilità del tempo di tutto rosso, e di conseguenza del perditempo totale L e della lunghezza del ciclo C, in funzione della velocità V_V richiama una legge del tipo: $y = K \cdot x^{-m}$, dove K e m sono delle costanti.

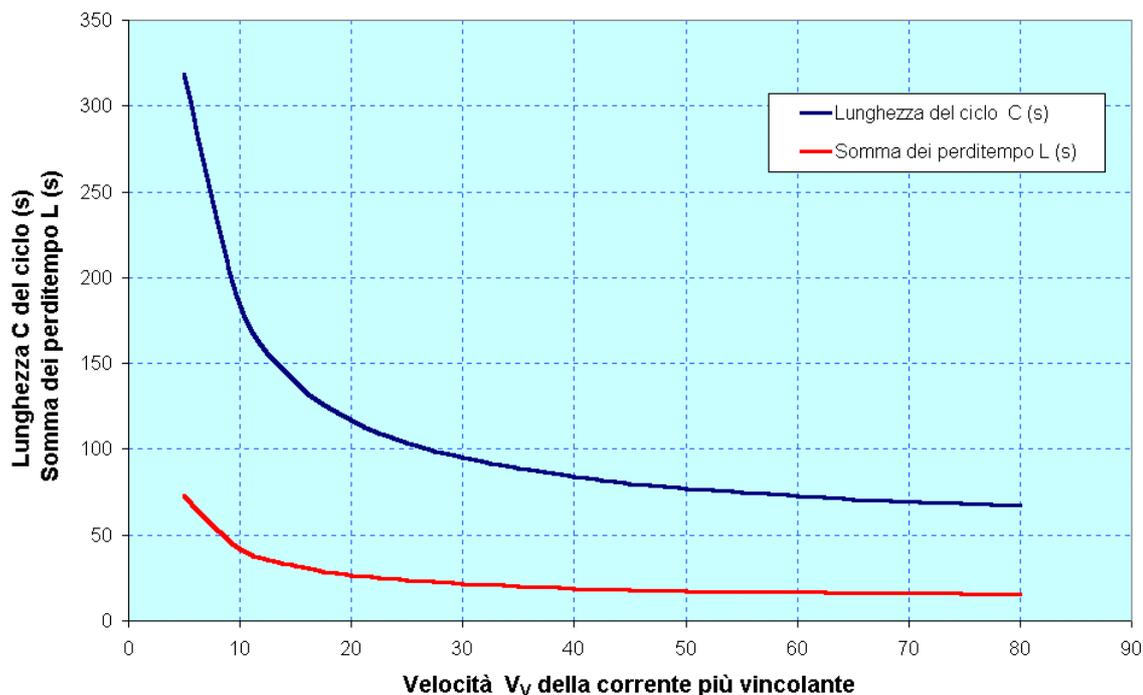


Figura 2: Relazioni tra la velocità V_V e la somma L dei perditempo (s) e la lunghezza del ciclo C(s).

Per bassi valori di V_V sia L che C sono molto elevati, ma, all'aumentare di V_V , il perditempo L e la lunghezza del ciclo C decrescono rapidamente. La normativa italiana, nelle tabelle 1 e 2, considera un valore minimo di V_V pari a 20 km/h. In realtà, come si vede dal grafico, per velocità V_V superiori a 20 km/h il perditempo L e la lunghezza del ciclo C non variano in maniera rilevante, ma è anche vero che, in situazioni critiche di traffico, le manovre all'intersezione sono realizzate con velocità medie molto basse.

In effetti, la norma si pone in una situazione di non congestione, presupponendo che il ciclo semaforico smaltisca tutto il traffico in arrivo nel ciclo, ma non facendo però alcun riferimento alle condizioni di capacità dell'intersezione.

Nella realtà, le code ai rami avranno una velocità di attraversamento più elevata se si è lontani dall'attingimento del valore di capacità, viceversa la loro velocità sarà bassa se i rami dell'intersezione si trovano in condizioni di saturazione, in virtù del fatto che in questa situazione si hanno elevati condizionamenti tra i veicoli.

Si ritiene quindi che il parametro V_V , proprio per l'aleatorietà che lo caratterizza, non sia adeguato ad essere utilizzato come valore di progetto per il calcolo del tempo di tutto rosso, soprattutto in condizioni di flussi elevati di traffico.

Altri parametri sui quali occorre svolgere alcune considerazioni critiche sono il tempo t_{dp} di percezione e decisione e il coefficiente d'aderenza f_a , i quali intervengono nel calcolo dello spazio di frenatura S_f e, quindi, nella valutazione del tempo di tutto rosso. La norma CNR consiglia un valore pari a 1 secondo per il tempo di percezione e decisione. Per rappresentare una situazione di progettazione di impianto semaforico più generale possibile potrebbe essere opportuno considerare un tempo t_{dp} più elevato, almeno pari a 2 secondi per tener conto di diversi fattori (l'età del guidatore, il carico delle informazioni e lo stress a cui è soggetto, il posizionamento degli strumenti di bordo).

Il coefficiente di aderenza f_a è ricavato in funzione della velocità dalla tabella 1.

V_A	40	50	60	70
f_a	0.43	0.40	0.37	0.35

Tabella 1: Coefficiente d'aderenza f_a in funzione della velocità d'arrivo V_A .

I valori riportati nella suddetta tabella fanno parte di un intervallo di velocità molto ristretto (40 - 70 km/h). Senz'altro, velocità più basse comporteranno valori di coefficienti d'aderenza più elevati; si deve tuttavia notare come la legge di variabilità del coefficiente di aderenza espressa dai valori indicati, si riferisca ad una particolare situazione (peraltro non specificata), non contemplando in alcun modo le situazioni meteorologiche critiche (pioggia), le possibili condizioni non ottimali del parco veicolare (pneumatici usurati o a pressioni di gonfiaggio non adeguate) e le condizioni fortuite in cui si possono trovare i vari rami (presenza di liquidi sulla pavimentazione), in cui il coefficiente d'aderenza, come è noto, si abbassa in modo inequivocabile.

In definitiva, dal confronto tra le procedure per la valutazione della lunghezza dei cicli semaforici, emerge l'estrema difficoltà nel dare un'interpretazione univoca alla metodologia descritta dal CNR. In effetti il calcolo del tempo di tutto rosso presenta parecchie ambiguità, ed è quantomeno sospetto il fatto che, nell'esempio riportato dallo stesso bollettino del CNR, il tempo di tutto rosso non venga nemmeno preso in considerazione ("non esistono tempi di tutto rosso, in quanto le larghezze dei vari rami dell'intersezione sono tali da non richiedere un tempo di sgombero, oltre il giallo").

3. La valutazione del flusso di saturazione.

Il flusso di saturazione, nella normativa italiana, viene legato esclusivamente alla larghezza dell'accesso, definendo quest'ultimo come l'insieme di una o più corsie contigue, del medesimo ramo dell'intersezione, specializzate per una o più correnti di traffico che ottengono la via libera simultaneamente, secondo la relazione:

$$S_j = (165 \cdot a_j) + 45 \quad (UA/15') \quad (6)$$

dove:

- S_j è il flusso di saturazione della corrente di traffico j ;
- a_j è la larghezza (in metri) della sezione di accesso della (o delle) corrente j in esame.

Il flusso di saturazione di una corrente di traffico, per la normativa italiana, rappresenta il massimo numero di veicoli che può transitare ininterrottamente su una sezione posta lungo la traiettoria della corrente medesima nella base temporale prescelta (pari a 15 minuti). La (6) è valida, come recita la norma, in assenza di specifici risultati da indagini locali. Inoltre, con riferimento ai valori esposti per il flusso di saturazione e tenuto conto delle larghezze standard delle corsie di canalizzazione (cfr. § 3.1.3 "Numero delle corsie per senso di marcia", B.U. n° 60/78), il flusso di saturazione è da valutare con la seguente formula:

$$S_j = (575 \cdot m_j) + (410 \cdot n_j) + 45 \quad (UA/15') \quad (7)$$

dove:

- ◆ m_j è il numero di corsie di larghezza pari a 3.50 m assegnate alla corrente j (per il transito anche dei mezzi pesanti);
- ◆ n_j è il numero di corsie di larghezza pari a 2.50 m assegnate alla medesima corrente j (per il transito di sole autovetture).

Il concetto di legare il calcolo del flusso di saturazione ai parametri m_j e n_j tramite la (7) oppure al valore di a_j a mezzo della (6), non porta alla redazione di un metodo generale di progettazione di un ciclo semaforico. Inoltre, *questo metodo di calcolo del flusso di saturazione è opinabile anche per il fatto che non fornisce alcuna indicazione su come valutare quei fattori che possono condizionare il flusso di saturazione*. I fattori cui si fa riferimento sono: il numero di corsie, la pendenza longitudinale dei rami, l'esistenza di soste in prossimità dell'incrocio, la presenza di fermate di autobus in corrispondenza dell'intersezione, l'ubicazione dell'intersezione nella città (cioè, se si trova, o no, in una

zona dove sono presenti degli “attrattori” di traffico) e i condizionamenti derivanti dalle manovre di svolta a destra e a sinistra.

Il calcolo del flusso di saturazione è necessario per la valutazione della somma degli indici di carico Y:

$$Y = \sum_{i=1}^{\Phi} y_i \quad (8)$$

dove:

$$y_i = \left(\frac{F_j}{S_j} \right)_{\max} \quad (9)$$

essendo:

- y_i , l'indice di carico più elevato tra quelli di tutte le correnti che ottengono via libera nella fase i-esima,
- F_j , il flusso previsto in transito della corrente di traffico j;
- Φ , il numero di fasi nel ciclo.

Il calcolo del flusso di saturazione con la (6) o la (7) porta ad una valutazione forse troppo ottimistica della capacità dell'intersezione. Ciò origina, dato che la somma Y degli indici di carico compare nella formula del calcolo del ciclo teorico (2), una sopravvalutazione del flusso di saturazione e, conseguentemente, una sottovalutazione sia della somma degli indici di carico Y che della lunghezza C del ciclo semaforico.

L'HCM definisce il flusso di saturazione come il flusso, in veicoli per ora, che potrebbe essere fornito da un gruppo di corsie, assumendo che la fase di verde sia sempre disponibile per il gruppo di corsie per il quale il rapporto di verde g/C è pari a 1.0 (g è la lunghezza del verde effettivo).

Il calcolo del flusso di saturazione prevede la selezione del flusso ideale s_0 , (valore consigliato = 1900 veicoli per ora di verde per corsia) e la successiva correzione dello stesso mediante una serie di fattori moltiplicativi che riflettono la non idealità delle condizioni realmente esistenti. Infatti il flusso di saturazione per il manuale americano viene valutato con la seguente relazione:

$$s = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{RT} \cdot f_{LT} \quad (10)$$

dove:

- s è il flusso di saturazione per il gruppo di corsie in studio, espresso come totale per tutte le corsie del gruppo nelle condizioni esistenti, in veicoli/ora;

- s_0 è il flusso di saturazione ideale per corsia, di solito 1900 veicoli leggeri per ora di verde per corsia;
- N è il numero di corsie nel gruppo;
- f_w è il fattore di correzione per la larghezza della corsia (la corsia standard è di 12 ft);
- f_{HV} è il fattore di correzione per i veicoli pesanti presenti nella corrente di traffico;
- f_g è il fattore di correzione per la pendenza del ramo;
- f_p è il fattore di correzione per l'esistenza di una corsia di sosta adiacente al gruppo di corsie e per l'attività di parcheggio in quella corsia;
- f_{bb} è il fattore di correzione per l'effetto di blocco del traffico dovuto agli autobus che fermano nell'area dell'intersezione;
- f_a è il fattore di correzione dovuto al tipo di area;
- f_{RT} è il fattore di correzione per la svolta a destra nel gruppo di corsie;
- f_{LT} è il fattore di correzione per la svolta a sinistra nel gruppo di corsie.

E' prassi abituale da parte degli autori dell'Highway Capacity Manual quella di fornire delle metodologie per la valutazione di quei parametri che è preferibile dedurre da osservazioni "sul campo". In effetti nell'appendice IV, "*Misura diretta del flusso di saturazione prevalente*", del capitolo 9, "*Signalized Intersections*", dell'Highway Capacity Manual, è riportata una procedura per il calcolo del flusso di saturazione.

Tale procedimento si articola nelle seguenti fasi:

1. General tasks.

- a) Misurazione e registrazione delle caratteristiche tipologiche dell'area.
- b) Annotazione di tutti i dati di identificazione.
- c) Selezione di un punto d'osservazione, laddove la linea di stop per la corsia designata e il corrispondente semaforo siano chiaramente visibili.
- d) Il punto di riferimento è normalmente la linea di stop. I veicoli dovrebbero fermarsi abbondantemente prima della linea di stop. Quando un veicolo la attraversa non impedito, esso si considera "entrato" nello spazio di conflitto dell'intersezione ai fini della misura del flusso di saturazione. I veicoli che svoltano a sinistra o a destra, che "cedono" al traffico d'attraversamento in opposizione o ai pedoni, non sono registrati finché essi non procedono attraverso il traffico in opposizione.

2. Recorder tasks.

- a) Annotazione dell'ultimo veicolo in coda quando "scatta" il verde.

- b) Descrizione, con un timer, delle evoluzioni dell'ultimo veicolo.
 - c) Annotazione sul foglio di lavoro delle diverse tipologie di veicoli (leggeri o pesanti) e di quali veicoli svoltano a destra o a sinistra.
 - d) Registrazione del tempo segnalato dal timer.
3. Timer tasks.
- a) Azionamento di un cronometro, all'inizio del verde, e notificazione ad un registratore vocale dell'avvio della misurazione.
 - b) Conteggio ad alta voce di ogni veicolo nella coda che attraversa, con il suo asse posteriore, la linea di stop.
 - c) Comunicazione al registratore dei tempi del quarto, decimo, e dell'ultimo veicolo nella coda.
 - d) Se i veicoli accodati stanno entrando nell'intersezione alla fine del verde, occorre dire a voce alta "saturazione in corrispondenza della fine del verde, l'ultimo veicolo era il x-esimo".

E' necessario poi annotare qualunque evento inusuale possa condizionare il flusso di saturazione (fermate degli autobus, veicoli in sosta, autocarri che scaricano, ecc..). Il periodo del flusso di saturazione inizia, quando l'asse posteriore del quarto veicolo nella coda attraversa la linea di stop o il punto di riferimento, e finisce quando l'asse posteriore dell'ultimo veicolo in coda attraversa, alla fine del tempo di verde, la linea di stop. Le misure sono fatte da ciclo a ciclo. Per ridurre i dati per ogni ciclo, il tempo registrato per il quarto veicolo è sottratto dal tempo registrato per l'ultimo veicolo in coda. Questo valore è il totale per (n-4) veicoli, dove n è il numero dell'ultimo veicolo rilevato (questo può non essere l'ultimo veicolo nella coda). Il totale è diviso per (n-4), al fine di ottenere la media per veicolo sotto il flusso di saturazione. Il flusso di saturazione è 3600 diviso per questo valore. Per esempio, se il tempo per il quarto veicolo è di 10.2 secondi e il tempo per l'ultimo veicolo rilevato è 36.5 secondi, il valore medio di saturazione per veicolo risulta: $(36.5-10.2)/(14-4)=2.63$ secondi per veicolo, e il flusso di saturazione presente in quel ciclo verrebbe: $3600/2.63=1369$ veicoli per ora di verde e per corsia. Si noti infine che per ottenere un valore statisticamente valido, sono di solito necessari un minimo di 15 cicli semaforici con più di 8 veicoli nella coda iniziale. Una media dei valori di flusso di saturazione, nei singoli cicli, rappresenta allora il flusso di saturazione esistente per la corsia rilevata.

Per il rilievo dei flussi di saturazione relativi ai rami dell'intersezione analizzata, è stato adottato questo metodo, con la differenza di aver sostituito al registratore vocale un calcolatore della Hewlett Packard, modello 48 S, capace di registrare il tempo d'inizio del rilievo ed i tempi di passaggio dei vari veicoli in coda.

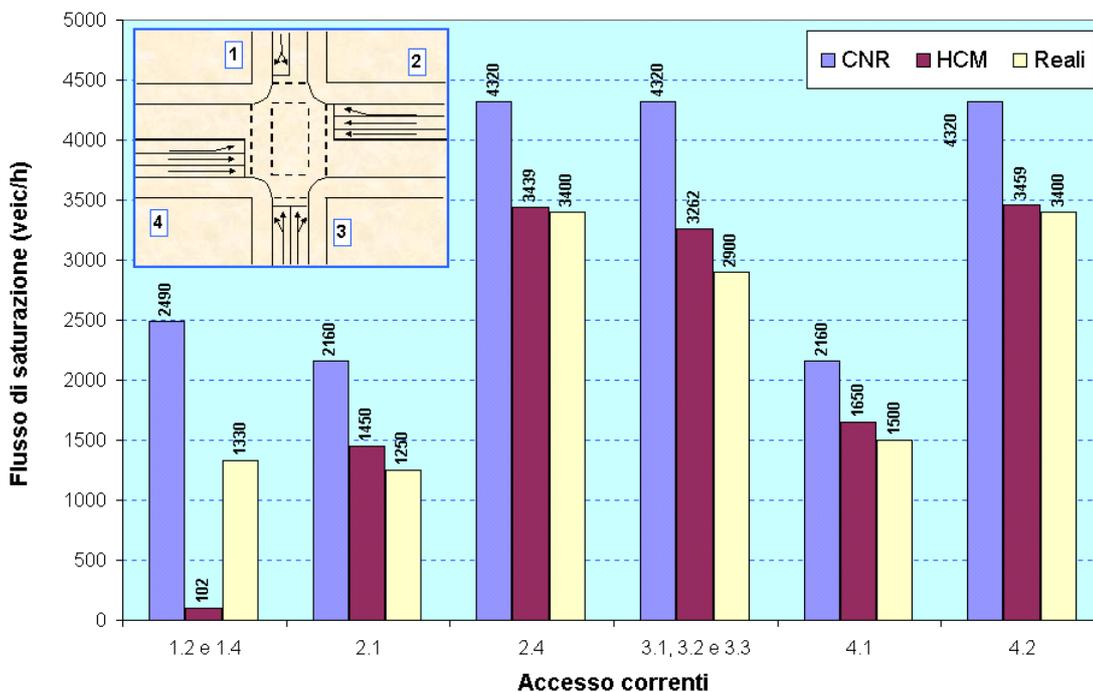


Figura 3: Flussi di saturazione dell'intersezione studiata, secondo la norma italiana (CNR) e il manuale statunitense (HCM).

Il rilievo è stato realizzato in data 02/02/'98. I valori del flusso di saturazione così ricavati sono stati confrontati con quelli calcolati mediante i metodi indicati dal CNR e dall'HCM (figura 3).

Dall'analisi del grafico in figura 4 si deduce che i valori del flusso di saturazione calcolati mediante la metodologia proposta dal CNR sono *sempre* più elevati, di quelli realmente rilevati per l'intersezione in esame. In effetti i valori dei flussi di saturazione, calcolati con la (6), si rivelano, ovunque, percentualmente maggiori di quelli reali (si passa da una differenza minima del 21 % ad una massima del 47 %).

I flussi di saturazione valutati a mezzo della procedura suggerita dall'HCM, risultano invece pressoché identici a quelli prevalenti nell'intersezione in esame (lo scostamento massimo, rispetto ai valori reali, supera di poco il 10 %), ad eccezione dell'accesso 1, per cui il flusso di saturazione calcolato con l'HCM è nettamente inferiore a quello reale. Ciò è dovuto al fatto che il fattore di correzione di svolta a sinistra, calcolato con la speciale

procedura, indicata dal manuale americano, per il caso di svolta a sinistra permessa da un accesso ad unica corsia opposto ad un accesso multicorsia, pari a 0.063, risulta eccessivamente severo nei confronti delle modalità di impiego di tali accessi, tipiche della realtà italiana.

Fatta eccezione, comunque, per il ramo prima indicato, i flussi computati con la (10) appaiono più realistici di quelli valutati con la (6). Si ritiene pertanto che il calcolo del flusso di saturazione, quando non può essere effettuato in situ, debba essere condotto con il criterio statunitense che, pur proponendo alcune procedure di calcolo troppo "cautelative", si è rivelato più attendibile di quello italiano.

4. Capacità e livelli di servizio delle intersezioni semaforizzate.

La *capacità* (veicoli/ora) di un'intersezione semaforizzata rappresenta il numero massimo di veicoli che possono attraversare l'intersezione per una determinata direzione nelle condizioni prevalenti stradali e di traffico per un dato intervallo di tempo. La capacità di un'intersezione è fortemente dipendente dalla semaforizzazione presente. In effetti, la semaforizzazione, potendo essere cambiata frequentemente e velocemente, permette considerevoli libertà nella gestione della capacità fisica dello spazio e della geometria dell'intersezione. La capacità nelle intersezioni semaforizzate è basata sul concetto di flusso di saturazione, su cui si è ampiamente discusso in precedenza.

Il *livello di servizio* è una misura delle caratteristiche di mobilità di una intersezione; è definito in termini di ritardo, ed è la misura del disagio e della frustrazione del guidatore, del consumo del carburante e del tempo di viaggio perso. In particolare il livello di servizio è misurato in termini di ritardo medio di fermata (il tempo di stazionamento di un veicolo in un incrocio) per veicolo per un periodo di 15 minuti. Il ritardo può essere misurato sul campo o stimato usando le procedure presentate dall'HCM; esso è una misura complessa e dipende da un certo numero di variabili.

I concetti di capacità e livello di servizio sono fondamentali nell'analisi delle intersezioni semaforizzate, come lo sono anche per tutti i tipi di infrastrutture per le quali si richiedono informazioni sulle caratteristiche quali-quantitative della circolazione. Nell'analisi delle intersezioni, tuttavia, i due concetti non sono così fortemente correlati come accade per le procedure analoghe illustrate dall'HCM.

L'analisi della capacità è fatta tramite il calcolo del rapporto volume/capacità per ogni gruppo di corsie. Il rapporto v/c è il flusso reale o progettato, di un designato gruppo di corsie durante un intervallo di punta di 15 minuti, diviso per la capacità dell'intera intersezione. Il livello di servizio è basato sul ritardo medio di fermata per veicolo, per le varie manovre nell'intersezione. Nonostante il rapporto v/c influisca sul ritardo, ci sono altri parametri che lo influenzano maggiormente, quali la qualità della progressione, la lunghezza delle fasi di verde, la lunghezza del ciclo e altro. Dunque, per ogni rapporto v/c assegnato, possono risultare diversi valori di ritardo e viceversa.

In pratica, comunque, deve essere riconosciuto che un'intersezione non può funzionare oltre una certa capacità senza avere un ritardo eccessivo.

Analogamente al "caso" del flusso di saturazione, anche la procedura suggerita dall'HCM per il calcolo della capacità è stata verificata sul campo (con riferimento sempre alla medesima intersezione).

Codice corrente	1.2 e 1.4	2.1	2.4	3.1 e 3.2 e 3.4	4.1	4.2
Capacità (veicoli/ora)	58	516	1223	1848	46	1384
Livello di servizio	F	D	F	D	F	F

Tabella 2: Capacità e livello di servizio dell'intersezione studiata, in base ai flussi di saturazione calcolati mediante l'HCM (tenendo conto che il ciclo C rilevato è di 180 secondi, che sono suddivisi rispettivamente tra le fasi come tempi di verde e di giallo + tutto rosso in 62 e 5 per la prima, 5 e 3 per la seconda fase e 100 e 5 per la terza fase).

La tabella 2 mostra i valori di capacità e di livello di servizio, per l'intersezione in esame, calcolati in funzione dei flussi di saturazione dedotti tramite la (10).

Codice corrente	1.2 e 1.4	2.1	2.4	3.1 e 3.2 e 3.4	4.1	4.2
Flusso di saturazione s reale (veicoli/h)	1330	1250	3400	2700	1500	3400
Rapporto di verde, g/C	0.57	0.36	0.36	0.57	0.03	0.40
Capacità c (veicoli/ora): $c = s \cdot \frac{g}{C}$	758	450	1224	1539	45	1360

Tabella 3: Capacità studiata, in base ai flussi di saturazione reali (tenendo conto che il ciclo C rilevato è di 180 secondi, che sono suddivisi rispettivamente tra le fasi come tempi di verde e di giallo + tutto rosso in 62 e 5 per la prima, 5 e 3 per la seconda fase e 100 e 5 per la terza fase).

Nella tabella 3 la capacità è stata calcolata considerando i flussi di saturazione reali; come era logico aspettarsi, tali valori sono molto vicini ai valori di capacità ricavati col metodo

americano, tranne per l'accesso 1 per cui è già stato evidenziato come il criterio statunitense sia oltremodo restrittivo.

I suddetti valori di capacità sono confrontati in figura 4.

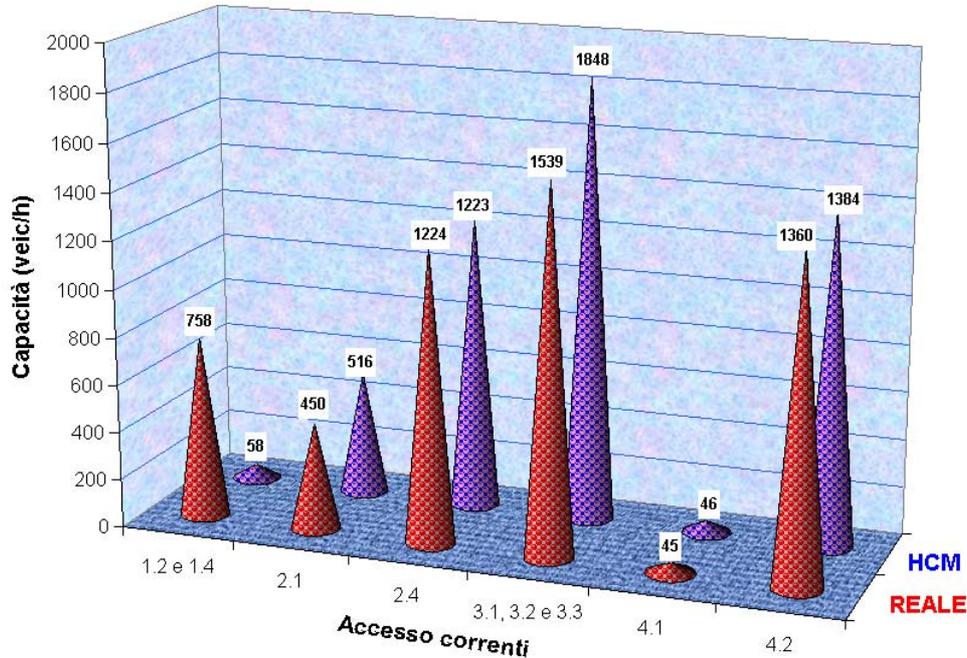


Figura 4: Confronto tra i valori di capacità reali e quelli valutati con l'HCM.

Nella normativa italiana non si fa alcun riferimento ai concetti di capacità e livello di servizio, nonostante questi siano fondamentali per un'analisi dettagliata dell'intersezione.

Il CNR propone soltanto una procedura di verifica che, in maniera alquanto grossolana, si può considerare valutativa della qualità della circolazione imposta dall'impianto semaforico. Tale verifica consiste nel computo della lunghezza della coda di ciascun ramo, tramite la seguente relazione:

$$l = d \cdot C \cdot \frac{F_j}{900 \cdot n} \quad (\text{metri}) \quad (11)$$

dove:

- l è la lunghezza della coda di veicoli (m);
- d è la lunghezza media del veicolo, pari a 5 m;
- C è la durata del ciclo;
- F_j è il flusso della j -esima corrente veicolare;

- n è il numero di corsie disponibili alla corrente veicolare j ;
- 900 sono i secondi presenti nell'intervallo di tempo considerato (15').

La norma afferma che le lunghezze della code devono essere confrontate, quanto meno, con le corrispondenti distanze della intersezione in esame da quelle limitrofe sui quattro rami, per evitare che i veicoli accumulati vadano ad ingombrare le rispettive aree di intersezione.

Si può osservare in primo luogo, che questa verifica è senz'altro valida per intersezioni che sono molto vicine (la coda che si forma in corrispondenza di un'intersezione potrebbe invadere l'area dell'intersezione a monte quando i due incroci in questione sono molto prossimi), ma certamente non è idonea per intersezioni isolate.

In ogni caso, la sola verifica della lunghezza delle code non si può ritenere in alcun modo un criterio idoneo a descrivere i condizionamenti derivanti dalla geometria dell'intersezione e dalle caratteristiche di circolazione indotte dalla successione dei cicli semaforici. Ancora una volta, dunque, l'Highway Capacity Manual, proponendo la valutazione della capacità e del livello di ritardo apportato dalla semaforizzazione dell'incrocio (livello di servizio), palesa la propria "vocazione" a strumento flessibile non soltanto per la progettazione, ma anche per la gestione delle intersezioni semaforizzate.

5. Conclusioni.

In questo studio sono stati analizzati i metodi di progettazione delle regolazioni semaforiche proposti dall'Highway Capacity Manual e dal CNR (B.U. 150).

In particolare, si è tentato, grazie anche al supporto di rilievi "in loco", di evidenziare i punti di divergenza tra le due metodologie e gli scostamenti con le situazioni caratteristiche della realtà italiana.

In primo luogo, si è messo in evidenza il fatto che la normativa italiana consiglia, per il calcolo della lunghezza del ciclo semaforico, l'utilizzo di una relazione dipendente da parametri troppo aleatori (la velocità V_v della corrente più vincolante, la lunghezza della traiettoria D della corrente più vincolante, il tempo t_{ap} di reazione dei guidatori e il coefficiente di aderenza f_a), per poter essere validi "in sede" di progettazione della regolazione semaforica di un incrocio.

Il manuale americano, invece, suggerisce una procedura in cui entrano in gioco parametri univocamente ricavabili dalle condizioni di traffico dell'intersezione.

Dalla successiva analisi dei metodi di calcolo del flusso di saturazione è stato possibile evincere come la norma CNR, non mettendo in conto tutti quei fattori legati alle reali condizioni geometriche e di traffico dell'incrocio, fornisca valori dei flussi di saturazione irrealisticamente elevati; il metodo statunitense, viceversa, fornisce valori più attendibili, anche se in alcuni casi risulta essere eccessivamente "cautelativo" nei confronti della realtà italiana.

Si è poi evidenziato come l'HCM tratti ampiamente concetti fondamentali per la determinazione della qualità del deflusso delle intersezioni semaforizzate, quali la capacità e il livello di servizio, mentre la norma CNR non fa nessun cenno a queste due importanti nozioni, limitandosi ad una grossolana valutazione della lunghezza delle code in accumulo sui rami degli incroci.

Alla luce di quanto è stato esposto, pur apprezzando lo sforzo compiuto dai normatori italiani per fornire uno strumento a tecnici ed amministratori che devono affrontare quotidianamente problemi di traffico, non si può fare a meno di ribadire il fatto che la normativa italiana, necessiti di una revisione critica e di un completamento indispensabili per fornire tutte quelle indicazioni fondamentali per la corretta progettazione di un impianto semaforico complesso.

6. Bibliografia.

- [1] Cera L.: Fluidità e sicurezza, "*Progetto semaforico per incroci a raso*", Ondaverde, Anno V, n. 24, 1993.
- [2] CNR: "*Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane*", Bollettino Ufficiale n. 150, 15 Dicembre 1992.
- [3] Ferrari P.: "*L'influenza della dettagliata definizione delle manovre alle intersezioni sulla assegnazione del traffico alle reti semaforizzate*", CNR PFT2, Maggio 1996.
- [4] Ferrari P.: "*Un metodo per la scelta di piani del traffico su reti semaforizzate*", CNR PFT2, Maggio 1995.
- [5] Guerra C., Mussone L. (1995): "*Linee evolutive della regolazione semaforica nel controllo del traffico urbano*", Trasporti e Trazione, Anno VIII, n. 1, Febbraio 1995.
- [6] Ignaccolo M., Giunta U.: "*Evoluzione del deflusso veicolare lungo la circonvallazione nord di Catania*", Le Strade, Anno XCVIII, n. 1322, Settembre 1996.
- [7] KLD Associates, Inc. and Polytechnic University: "*HCM/Cinema, The Full Picture on intersection capacity and level of service, User Guide*", Copyright 1990, KLD Associates, Inc. All rights reserved.
- [8] Kronborg P., Davidsson F.: "*MOVA and LHOVRA: traffic signal control for isolates intersections*", Traffic Engineering + Control, Vol. 34, n. 4, Aprile 1993.

[9] Transportation Research Board (Ottobre 1994): “*Highway Capacity Manual*”, Capitolo 9 “Signalized Intersections”.

[10] Villa M.: “*Incidenti e riflessi. La svolta a sinistra con semaforo o no*”, Ondaverde, Anno IV, n.15, 1992.