

2.4) Intersezioni urbane semaforizzate.

La regolazione semaforica è la tecnica usualmente adottata per il controllo degli incroci urbani caratterizzati da flussi rilevanti, tali cioè da non consentire l'adozione di una regolazione basata sulle usuali regole di priorità (precedenza a destra) o su una segnaletica fissa ("STOP" o "dare precedenza").

La funzione principale dell'impianto semaforico è di disciplinare le manovre che avvengono all'intersezione, determinando il periodico arresto di ciascuna corrente in modo tale da consentire, sfalsandolo nel tempo, il passaggio di tutti i veicoli ed evitare, se possibile, traiettorie di conflitto tra i veicoli o tra veicoli e flussi pedonali; in questo modo si aumenta la sicurezza dell'intersezione e si riducono i ritardi ad essa connessi.

2.4.1) Principi basilari.

Una intersezione ha più rami di ingresso (accessi) e di uscita, e ciascuno di essi può avere una o più corsie. Ogni corsia può a sua volta servire una o più correnti di traffico¹.

Il segnale emesso dal semaforo può essere di tre tipi:

- luce verde: indica "via libera";
- luce gialla: indica che i veicoli che sopraggiungono devono fermarsi, se sono in condizioni di sicurezza per farlo, altrimenti devono liberare al più presto l'intersezione;
- luce rossa: comanda l'arresto dei veicoli.

Il "**ciclo semaforico**" è una sequenza completa di segnali e la sua durata è indicata con C (sec).

Si dice "**intervallo**" un periodo di tempo durante il quale i segnali restano fissi.

E' detta "**fase**" la frazione di un ciclo che assegna ad alcune correnti di traffico (gruppo di correnti) simultaneamente il segnale di "via libera" durante uno o più intervalli: nel caso di un incrocio a quattro bracci il caso più semplice si ha quando il ciclo semaforico è a due fasi, una con verde per due accessi e rosso per gli altri due e l'altra viceversa; si possono però avere cicli a tre o più fasi semaforiche, quando, ad es., si vogliono evitare punti di conflitto tra i veicoli che svoltano a sinistra e quelli che attraversano l'intersezione in senso opposto.

E' detto, poi, "**interverde**" o "**intervallo di cambio**" la somma dei tempi di "giallo" e "tutto rosso" (rosso a tutti i semafori) che si hanno alla fine di una fase di verde per consentire l'arresto del flusso e lo sgombero dell'area di conflitto, prima di dare il via

¹Si intende per corrente di traffico l'insieme di veicoli che giunti all'intersezione devono eseguire la stessa manovra: attraversamento, svolta a destra o svolta a sinistra.

libera ad altre correnti di traffico; a volte esso è indicato semplicemente come “tempo di giallo”, includendo in esso anche il tempo di “tutto rosso”. L'interverde è indicato con Y_i (sec) per la corrente, o gruppo di correnti “i”.

E' detto “**tempo di verde**” G_i (sec) l'intervallo di tempo durante il quale viene dato il segnale di verde alla corrente “i”.

Analogamente si definisce il “**tempo di rosso**” R_i .

I valori R, Y e G variano in genere da corrente a corrente, ma per tutte si ha:

$$C = G_i + Y_i + R_i$$

Consideriamo ora una coda di veicoli che si è formata ad un accesso all'intersezione durante un tempo di rosso; quando il segnale diventa di via libera (luce verde) il primo veicolo della coda, dopo un tempo di percezione e reazione, parte e lascia l'intersezione; la stessa cosa fanno a seguire gli altri veicoli in coda.

Il volume (o portata) che attraversa la linea di arresto dell'accesso alla comparsa del verde aumenta dal valore zero, che si ha durante il tempo di rosso, ad un valore massimo, detto “**flusso di saturazione**” s (è ovvio che tale valore massimo si raggiunge solo se l'accesso è saturo, cioè quando il numero di veicoli che chiede di passare è maggiore di quello che riesce a transitare), si mantiene poi praticamente costante fino a pochi istanti dopo la comparsa del giallo, per andare infine a zero. Questo andamento è riportato in fig. 1.8.

FIG. 1.8

Il flusso di saturazione “s” può essere riferito ad una sola corsia dell'accesso o a più corsie di esso (tutte quelle a cui viene dato contemporaneamente il segnale di verde); anche in questo caso il pedice “i” individua la corrente o le correnti che utilizzano le suddette corsie.

Risulta molto comodo nelle applicazioni considerare per il deflusso in un accesso saturo solo due periodi alternati:

- **verde efficace**: g_i (sec);
- **rosso efficace**²: r_i (sec).

Durante il periodo di verde efficace si assume che il deflusso dei veicoli della corrente “i” avvenga con volume costante e pari al flusso di saturazione; esso è, pertanto, minore del verde reale durante il quale il flusso in transito non è sempre quello di saturazione. Durante il rosso efficace si assume volume nullo. Si avrà, quindi:

$$\begin{aligned} C &= g_i + r_i \\ r_i &> R_i \\ g_i &< G_i + Y_i \end{aligned}$$

Per il calcolo del tempo di verde efficace si deve far riferimento a situazioni di accesso saturo, per le quali si impone:

$$g_i \cdot s_i = \int_0^{G_i+Y_i} v_i(t) dt$$

dove $v_i(t)$ è la portata che attraversa la linea di arresto all'intersezione nell'istante di tempo t.

Da tale relazione si nota che g_i è tale che g_i/s_i è uguale al numero medio di veicoli effettivamente transitati durante il ciclo; quindi:

$$g_i = \frac{1}{s_i} \cdot \int_0^{G_i+Y_i} v_i(t) dt \quad (\text{sec})$$

L'uso del verde efficace equivale a sostituire all'area sottesa alla curva $v_i(t)$ quella equivalente di un rettangolo di altezza s_i e base g_i .

Il rosso efficace è dato invece da: $r_i = C - g_i$.

La differenza tra la somma dei tempi di verde e interverde ed il verde efficace è detta “**tempo perso**” L_i (sec):

²In alcuni casi il termine inglese effective è anche tradotto come effettivo, per cui non è raro trovare, per queste grandezze la dizione “verde effettivo” e “rosso effettivo”.

$$L_i = G_i + Y_i - g_i$$

Il tempo perso tiene conto che all'inizio ed alla fine dell'intervallo di tempo $G_i + Y_i$ il deflusso dei veicoli avviene con portata minore di quella di saturazione a causa dell'"inerzia" del flusso in fase di avviamento e dell'arresto graduale durante la fase di giallo; pertanto il tempo perso viene diviso in due aliquote: *tempo perso all'avviamento* L_{ai} e *tempo perso per lo sgombero* L_{si} . Si ha quindi che:

$$L_i = L_{ai} + L_{si}$$

I valori di L_{ai} e di L_{si} variano da caso a caso; usualmente risulta:

— $L_{ai} = 2,3$ sec.

— $L_{si} = 1,2$ sec.

E' evidente, poi, che: $r_i = R_i + L_i$

Nel caso in cui gli accessi non sono saturi, si può operare considerando che il deflusso dei veicoli avvenga con tasso pari a quello di saturazione dall'inizio del verde efficace sino allo smaltimento della coda, e con tasso pari a quello di arrivo per il restante periodo di verde efficace.

Gli impianti semaforici possono operare in tre modi diversi:

- 1) **Funzionamento predeterminato.** In caso di funzionamento predeterminato la lunghezza del ciclo, le fasi, i tempi di verde e gli interverde hanno tutti dei valori prestabiliti. Il segnale varia all'interno del ciclo in maniera costante: ogni ciclo è lo stesso, con la stessa durata e lunghezza costante delle fasi.
- 2) **Funzionamento semiattuato.** In questo secondo caso la strada principale ha sempre il segnale di verde, finché dei *detector*, inseriti nella pavimentazione della strada secondaria, non segnalano l'arrivo di uno o più veicoli all'intersezione. A questo punto l'impianto darà il segnale di verde agli accessi della strada secondaria, dopo aver arrestato il flusso della strada principale, consentendo così il passaggio dei veicoli. Il tempo di verde assegnato ai flussi della strada secondaria viene calcolato volta per volta in funzione del numero di veicoli che chiedono di transitare senza superare, però, un valore massimo prefissato. In questo caso le durate del ciclo e dei tempi di verde si adeguano all'andamento della domanda di trasporto; inoltre, i tempi di verde sono virtualmente utilizzati al massimo, visto che l'eventuale parte in eccesso per la strada secondaria è ceduto alla strada principale.
- 3) **Funzionamento attuato.** Nel caso di funzionamento attuato tutti gli accessi sono sorvegliati da *detector*, i quali, rilevato il flusso, inviano i dati ad una centralina che

stabilisce caso per caso le durate del ciclo e dei tempi di verde, che quindi variano considerevolmente con la domanda. In questo caso vengono fissati per ogni fase i valori massimo e minimo dei tempi di verde. Alcune fasi del ciclo possono essere interamente saltate, perché inutili, se i *detector* non segnalano in corrispondenza dell'accesso, che ha il verde in quella fase, la presenza di domanda.

Il funzionamento dell'impianto può, inoltre, essere a:

- **semaforo isolato;** quando l'impianto è progettato e gestito indipendentemente da altri impianti adiacenti;
- **rete semaforica;** quando diversi impianti adiacenti sono progettati e gestiti in modo coordinato.

Le manovre effettuate dai veicoli di un accesso all'intersezione durante una fase di verde possono essere di due tipi:

- a) **manovra protetta:** quando i veicoli che effettuano la manovra non entrano in conflitto con altre correnti veicolari o pedonali, che abbiano la precedenza;
- b) **manovra permessa:** quando i veicoli che effettuano la manovra entrano in conflitto con altre correnti prioritarie; è il caso della svolta a sinistra, qualora essa sia consentita in contemporanea con un flusso di attraversamento dall'accesso opposto.

Le problematiche da risolvere nello studio delle intersezioni semaforizzate sono molteplici; esse si possono distinguere in:

- **problemi di verifica;**
- **problemi di progetto.**

Il problema di verifica consiste fondamentalmente nella determinazione del livello di servizio dell'intersezione, noti i flussi di traffico, la geometria dell'intersezione e le caratteristiche del segnalamento.

I problemi di progetto sono in genere dei problemi "parziali": cioè note alcune caratteristiche dell'intersezione se ne vogliono progettare delle altre. Il caso più comune, che è poi quello che a noi interessa, si ha quando, note la geometria dell'intersezione e la domanda che la interessa, si vogliono progettare le caratteristiche dell'impianto semaforico:

- tipo di funzionamento;
- durata del ciclo;
- fasi;
- tempi di verde, giallo e rosso.

2.4.2) Il progetto dell'impianto semaforico.

La progettazione di un nuovo impianto semaforico ad una intersezione a raso si articola in quattro momenti fondamentali:

- 1) **Scelta del tipo di regolazione** (predeterminata o attuata).
- 2) **Scelta del piano di fasatura.**
- 3) **Progettazione del ciclo semaforico.**
- 4) **Determinazione del livello di servizio raggiunto.**

Esaminiamo di seguito i suddetti passi.

A) Il tipo di regolazione.

La scelta del tipo di regolazione (predeterminata, semiattuata o attuata) deve essere fatta caso per caso, soprattutto in relazione all'entità dei flussi che circolano sulle strade che si intersecano e alla loro relativa importanza.

L'impianto semaforico a **funzionamento predeterminato**, detto anche a "tempi di fase fissi", è la più semplice forma di regolazione di una intersezione a raso ed è anche la più diffusa per il costo contenuto e l'affidabilità raggiunta. Essa è adatta nel caso di intersezioni soggette a volumi di traffico che non variano di molto tra i diversi accessi e nel corso della giornata.

La **regolazione "attuata"** è la forma più flessibile (e costosa) di gestione degli impianti semaforici e viene, perciò, utilizzata solo se si ha una effettiva variazione di domanda nel corso della giornata e su direttrici di traffico intenso. In seguito (vedi paragrafo 2.4.5) tratteremo in modo più approfondito le varie metodologie di regolazione attuata del traffico.

B) Il piano di fasatura.

Fondamentale importanza assume, ai fini della progettazione dell'impianto, la scelta del piano di fasatura; esso consiste nello stabilire in quante fasi deve essere articolato il ciclo semaforico, quali manovre consentire in ogni fase e quale deve essere la successione tra le fasi.

Generalmente si preferisce, quando possibile, utilizzare due sole fasi, perché ciò riduce al minimo gli intervalli di "tempo perso", che si hanno ogni volta che si cambia fase. In questo caso, però, le manovre di svolta sono di tipo "permesso", per cui, nel caso di flussi di svolta elevati, si possono avere fenomeni di congestione dell'intersezione: in questi casi si preferisce utilizzare schemi multifase.

Per progettare il piano di fasatura bisogna conoscere, oltre l'entità dei flussi veicolari che effettuano le varie manovre e l'entità dei flussi pedonali, anche la geometria

dell'intersezione; infatti uno schema multifase potrà essere previsto solo se la geometria dell'intersezione consente la disposizione di un numero di corsie di attesa in ogni accesso almeno pari alle fasi di verde previste per lo stesso accesso. Ad esempio la presenza di una fase apposita per le svolte a sinistra richiede che sia presente una apposita corsia.

Ci sono molti criteri per stabilire quando è necessario predisporre una fase apposita per la svolta a sinistra; in genere ciò si fa quando i volumi che chiedono di svoltare eccedono i 150###200 veic./h e quando i flussi di attraversamento dall'accesso opposto sono elevati.

Una fase apposita per la svolta a destra protetta si predispose solo se i flussi pedonali sono molto elevati (maggiori di 1700-1800 ped./h).

La figura 1.9 mostra piani di fasatura detti comunemente “verde anticipato” e “verde ritardato” (le frecce a linea continua indicano le manovre “protette” durante la fase in oggetto, mentre quelle a linea tratteggiata indicano le manovre “permesse”). Nel caso (a) l'accesso inferiore ha verde prima di quello superiore: in questa fase (###A1) la svolta a sinistra è “protetta”; si parla allora di “verde anticipato”. Quando anche l'altro accesso ha il verde, le svolte a sinistra possono essere, a seconda dei casi, “proibite” o “permesse”; se proibite è necessaria la predisposizione di una apposita corsia.

Nel caso (b) entrambi gli accessi hanno il verde contemporaneamente, ma l'accesso superiore è bloccato prima di quello inferiore, consentendo da quest'ultimo svolte a sinistra “protette” (“verde ritardato”).

Solitamente l'uso di queste fasi è combinato in modo da dare “verde anticipato” ad un accesso e “verde ritardato” all'altro, per consentire, in opportuni intervalli di tempo, svolte a sinistra “protette” ad entrambi gli accessi (caso (c)).

L'uso del “verde anticipato” e del “verde ritardato” consente di ridurre i “tempi persi” e i ritardi causati dall'aggiunta di una fase esclusiva per le svolte a sinistra.

C) Progettazione del ciclo semaforico.

Scelto il tipo di regolazione ed il piano di fasatura bisogna progettare il ciclo semaforico, cioè determinare le durate del ciclo e dei tempi di “verde efficace” da dare ad ogni corrente di traffico (o gruppo di correnti); bisogna poi valutare il “tempo perso” e calcolare la durata dell'interverde, in modo da poter definire completamente le durate dei segnali di verde, giallo e rosso che compongono il ciclo.

Trattiamo di seguito i metodi classici per il calcolo della durata del ciclo ed i metodi per il calcolo del “tempo perso” e dell'interverde.

La durata del ciclo e la sua ripartizione in tempi di verde e rosso per ogni accesso o gruppo di corsie dovrebbe essere almeno tale da assicurare lo smaltimento di tutti i veicoli in arrivo all'intersezione da ciascuno dei suoi rami nel tempo di un ciclo; ciò per evitare la formazione di code crescenti nel tempo.

FIG. 1.9

[1.3]

Nel caso semplice di un incrocio a due fasi si può quindi dire che deve essere³:

$$s_1 \cdot g_1 \geq v_1 \cdot C$$

$$s_2 \cdot g_2 \geq v_2 \cdot C$$

dove:

s_i = flusso di saturazione dell'accesso o gruppo di corsie che ha il verde nella fase "i".

g_i = verde efficace della fase "i".

v_i = volume (o portata) in arrivo all'accesso che ha il verde nella fase "i".

C = durata del ciclo semaforico.

Queste relazioni esprimono la condizione che il numero di veicoli in arrivo in un ciclo agli accessi comandati da una certa fase deve essere minore o uguale del numero di veicoli smaltibile; cioè il numero di veicoli in arrivo deve essere minore o uguale della capacità dell'accesso. Infatti la capacità di un accesso all'intersezione viene definita come il massimo tasso di flusso che, servendosi dello stesso accesso, attraversa l'intersezione; essa è data da:

$$c_i = s_i \cdot (g_i / C)$$

dove:

c_i = capacità dell'accesso o gruppo di corsie "i".

La durata minima che deve avere il ciclo semaforico si ottiene imponendo l'uguaglianza:

³Una fase, in genere, dà il segnale di via libera a più accessi simultaneamente; in questo caso le relazioni si riferiscono, per ogni fase, all'accesso in cui il rapporto v/s è massimo. Nel caso in cui abbiamo per lo stesso accesso più corsie, ognuna della quali riservata ad una manovra effettuata nella fase, le stesse relazioni sono valide, considerando, però, per s_i e v_i il flusso di saturazione e la portata in arrivo della corsia per la quale il rapporto v/s è massimo.

$$s_1 \cdot g_1 = v_1 \cdot C \quad g_1 = \frac{v_1}{s_1} \cdot C$$

$$s_2 \cdot g_2 = v_2 \cdot C \quad g_2 = \frac{v_2}{s_2} \cdot C$$

Sommando membro a membro ottengo:

$$(g_1 + g_2) = \left(\frac{v_1}{s_1} + \frac{v_2}{s_2} \right) \cdot C$$

essendo: $g_1 = G_1 + Y_1 - L_1$

$$g_2 = G_2 + Y_2 - L_2$$

ed inoltre: $C = G_1 + Y_1 + G_2 + Y_2$ si ha:

$$C - (L_1 + L_2) = C \cdot \left(\frac{v_1}{s_1} + \frac{v_2}{s_2} \right)$$

da cui si ottiene la durata minima del ciclo:

$$C_{\min} = \frac{L_1 + L_2}{1 - \left(\frac{v_1}{s_1} + \frac{v_2}{s_2} \right)}$$

Nel caso di N fasi si può operare allo stesso modo ottenendo come durata minima del ciclo:

$$C_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{1 - \sum_{i=1}^N \frac{v_i}{s_i}}$$

Bisogna a questo punto precisare che i volumi in arrivo all'intersezione, utilizzati nella procedura, devono essere i tassi di flusso massimi riferiti a periodi di 15 min. all'interno dell'ora di punta.

La durata del ciclo semaforico così ottenuta non è la migliore possibile, né è detto che sia effettivamente utilizzabile; essa è, infatti, solo un valore limite dell'effettiva durata del ciclo (un altro valore limite deriva dalla presenza dei flussi pedonali, come sarà detto in seguito). Può poi capitare che tale valore sia troppo elevato: la durata del ciclo non dovrebbe mai superare i 90###100 s. per un ciclo a due fasi e i 120 s. per un ciclo multifase; questo perché una attesa eccessiva alla soglia dell'intersezione non è accettata dagli utenti. Se si superano tali limiti si dovrebbe modificare la geometria dell'intersezione.

La durata ottima del ciclo può essere calcolata tendendo a minimizzare il ritardo all'intersezione; uno studio in tal senso è stato svolto dal Webster. L'espressione a cui è giunto, molto complicata, è stata poi approssimata alla seguente:

$$C_0 = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - \sum (v/s)}$$

dove:

C_0 = durata ottima del ciclo (sec).

L = somma dei tempi persi di tutte le fasi (sec).

FIG. 1.10

[1.4]

La figura 1.10 mostra l'andamento del ritardo medio al variare della domanda, e dimostra l'esistenza di una durata ottima del ciclo (C_0) che minimizzi il ritardo per ogni valore della domanda; si nota inoltre come durate più piccole di quella ottima incrementino di molto il ritardo, mentre durate più grandi lo incrementano di poco.

Nota la durata del ciclo semaforico, le durate di "verde efficace" da dare ai due accessi sono date da:

$$g_1 = \frac{v_1}{s_1} \cdot C$$

$$g_2 = \frac{v_2}{s_2} \cdot C$$

La somma dei tempi di verde e giallo sono dati da:

$$G_1 + Y_1 = g_1 + L_1$$

$$G_2 + Y_2 = g_2 + L_2$$

I valori di L_1 e L_2 necessari per l'esecuzione della procedura possono essere stimati in base all'esperienza (essi sono somma di due termini, come già detto, e variano tra 3 e 5 s.), oppure, per intersezioni già in funzione, misurati con osservazioni dirette sul campo.

Uno dei metodi per calcolare il flusso di saturazione "s" dell'accesso (in veicoli per ora di verde efficace) è il cosiddetto "metodo inglese", riportato in appendice 1; per intersezioni già esistenti si possono effettuare delle misure sperimentali

Calcolati la durata del ciclo ed i tempi di verde efficace da dare ad ogni fase "i", le durate dei segnali di verde, giallo e rosso per la fase "i" si ottengono tenuto conto che:

$$G_i + Y_i = g_i + L_i \quad R_i = C - (G_i + Y_i)$$

Dato che g_i , L_i e C sono noti, è sufficiente calcolare Y_i .

Il termine Y_i ("interverde" o "intervallo di cambio") è costituito da due periodi distinti: la durata del giallo semaforico e la durata del "tutto rosso". La prima quantità in genere varia in un intervallo compreso tra 2 e 5 secondi, mentre la durata del "tutto rosso" è compresa nell'intervallo 0###2 sec. La durata del giallo semaforico viene determinata in modo tale che i veicoli possano arrestarsi o procedere in sicurezza in corrispondenza dell'intersezione. La durata del "tutto rosso" invece deve consentire ai veicoli che si trovano all'interno dell'area di conflitto alla fine del giallo semaforico di sgomberare l'intersezione, prima che il diritto di via libera venga assegnato alle altre correnti in attesa.

Sono state proposte diverse formule per il calcolo della durata del “giallo semaforico” (y) e del “tutto rosso” (AR); per il primo termine riportiamo la seguente formula facilmente utilizzabile nella pratica [1.5]:

$$y = t + \frac{v}{2 \cdot a + 2 \cdot G \cdot i}$$

dove:

y = durata del giallo semaforico (sec).

t = tempo di percezione e reazione (sec).

v = velocità dei veicoli all'intersezione (m/s).

a =decelerazione (m/s^2).

G = accelerazione di gravità (m/s^2).

i = pendenza dell'accesso.

Valori raccomandati:

t = 1.0 sec.

a = 3.0 m/s^2 .

G = 9.81 m/s^2 .

Per quanto riguarda il “tutto rosso” rimandiamo ai valori forniti dalle Norme CNR per le intersezioni semaforizzate, esaminate nel paragrafo 2.4.7.

L'interverde Y sarà la somma dei due termini suddetti:

$$Y = y + AR$$

Calcolato l'interverde abbiamo in pratica definito le durate reali dei segnali da assegnare ad ogni fase “ i ”, e quindi il ciclo semaforico è del tutto definito.

D) Esempio numerico.

Si debbano progettare i parametri di regolazione semaforica per una intersezione a 4 bracci. Si sia stabilito di voler utilizzare due sole fasi semaforiche.

Indichiamo con 1 e 3 gli accessi Nord e Sud, che hanno il verde nella fase 1, e con 2 e 4 gli accessi Est ed Ovest, che hanno il verde nella fase 2. Il tasso di flusso massimo in arrivo ad ogni accesso nei 15 minuti più carichi dell'ora di punta, per i quattro accessi, sia:

$$\begin{aligned}v_1 &= 800 \text{ veic/h} \\v_2 &= 1.000 \text{ veic/h} \\v_3 &= 950 \text{ veic/h} \\v_4 &= 600 \text{ veic/h}\end{aligned}$$

Gli accessi Nord e Sud abbiano larghezza 5,0 m e quelli Est e Ovest larghezza 4,5 m. Il flusso di saturazione degli accessi, calcolato con il metodo inglese (vedi appendice 1), supponendo per semplicità unitari i coefficienti correttivi (condizioni ideali) è pari a:

$$\begin{aligned}s_1 &= s_3 = 2.500 \text{ veic/h} \\s_2 &= s_4 = 2.240 \text{ veic/h}\end{aligned}$$

Il rapporto v/s (indice di carico) per i quattro accessi sono:

FASE 1	FASE 2
$v_1/s_1 = 0,32$	$v_2/s_2 = 0,45$
$v_3/s_3 = 0,38$	$v_4/s_4 = 0,27$

Gli indici di carico da utilizzare per il calcolo dei parametri di regolazione saranno $v_3/s_3 = 0,38$ e $v_2/s_2 = 0,45$, in quanto massimi relativamente agli accessi che hanno il verde nella stessa fase. Ipotizzando pari a 5 sec il tempo perso (L_i) relativo sia alla fase 1 che alla fase 2, la durata del ciclo semaforico minimo è data da:

$$C_{\min} = \frac{L_1 + L_2}{1 - \left(\frac{v_3}{s_3} + \frac{v_2}{s_2} \right)} = \frac{10}{1 - (0,38 + 0,45)} = 58,8 \text{ sec}$$

Assumiamo una durata effettiva del ciclo semaforico pari a 70 sec; non conviene, infatti, assumere come durata del ciclo proprio quella minima, ma incrementarla di almeno un 10-15 % per limitare i ritardi alle intersezioni e cautelarsi da eventuali fluttuazioni aleatorie della domanda.

Il verde efficace da dare ad ogni fase sarà pari a:

$$g_1 = C \cdot (v_3/s_3) = 70 \cdot 0,38 = 26,6 \text{ sec} \cong 27 \text{ sec}$$

$$g_2 = C \cdot (v_2/s_2) = 70 \cdot 0,45 = 31,5 \text{ sec} \cong 31 \text{ sec}$$

Detto Y_i il tempo di interverde, R_i il rosso semaforico e G_i il verde semaforico si ha:

$$G_1 + Y_1 = g_1 + L_1$$

$$G_2 + Y_2 = g_2 + L_2$$

Dove $Y_i = y_i + AR_i$, con y_i tempo di giallo semaforico e AR_i tempo di tutto rosso. Il valore di y_i può essere calcolato, come visto nel paragrafo precedente, nel seguente modo:

$$y_i = t + \frac{v_a}{2 \cdot a + 2 \cdot G \cdot i} = 1 + \frac{11}{2 \cdot 3 + 2 \cdot 9,8 \cdot 0} \cong 3 \text{ sec}$$

Avendo supposto che, per entrambi gli accessi, la velocità dei veicoli all'intersezione (v_a) sia pari a 40 km/h = 11 m/s, pendenza nulla, decelerazione 3 m/s² e tempo di percezione e reazione 1 sec.

Aggiungendo ad esso 2 sec di tutto-rosso si ottiene:

$$Y_i = 5 \text{ sec}$$

I tempi di verde G_i e rosso R_i per le due fasi saranno:

$$G_1 = g_1 + L_1 - Y_1 = 27 + 5 - 5 = 27 \text{ sec}$$

$$G_2 = g_2 + L_2 - Y_2 = 31 + 5 - 5 = 31 \text{ sec}$$

$$R_1 = C - (G_1 + Y_1) = 70 - (27 + 5) = 38 \text{ sec}$$

$$R_2 = C - (G_2 + Y_2) = 70 - (31 + 5) = 34 \text{ sec}$$

E) La determinazione del livello di servizio.

La determinazione del livello di servizio, per la intersezione così progettata, viene effettuata con la metodologia utilizzata per le intersezioni già esistenti, e riportata in appendice 2. Se il livello di servizio raggiunto non è soddisfacente bisogna ritornare alle fasi precedenti della progettazione e adottare opportuni provvedimenti, di tipo strutturale (costruzione sottopassi o sovrappassi, allargamento accessi, predisposizione di nuove corsie per le svolte etc.) o di tipo gestionale (diverso tipo di regolazione, diversa fasatura, nuovo ciclo semaforico etc.).

Il progetto di una intersezione semaforizzata risulta essere, allora, un processo di tipo iterativo, che, in genere, non si esaurisce alla prima iterazione.

2.4.3) Flussi pedonali.

In condizioni normali l'intervallo di tempo minimo da assegnare al verde pedonale deve essere compreso tra i 4 e i 7 secondi [1.6]. E' stato, poi, visto sperimentalmente che un intervallo di 4 secondi è adeguato solo per flussi molto modesti (massimo 10 pedoni per ciclo), mentre 7 secondi possono essere usati per volumi moderati (da 10 a 20 pedoni per ciclo) [1.7]. A tale intervallo di tempo minimo va sommato il tempo impiegato dai pedoni per attraversare l'intersezione; il tempo di verde pedonale minimo è allora dato da:

$$G_p = (4 \div 7 \text{ sec}) + \frac{\text{Distanza}}{\text{Velocità}}$$

Il valore minimo del verde pedonale risulta anche essere un vincolo per la minima durata del rosso per le manovre che vengono attraversate. Si deve infatti avere che:

$$R_i = [C - G_i - (y_i + AR_i)] > G_{pi}$$

dove:

R_i = tempo di rosso per la manovra sull'accesso "i" (sec).

C = durata ciclo semaforico (sec).

G_i = tempo di verde per la manovra sull'accesso "i" (sec).

$y_i + AR_i$ = interverde (sec).

G_{pi} = minimo tempo di verde pedonale per l'attraversamento dell'accesso "i" (sec).

Introducendo il tempo perso totale L , la stessa equazione può essere scritta come:

$$(C - L) - g_i \geq G_{pi}$$

da cui:

$$C \geq [L + G_{pi}] + g_i$$

che risulta essere un limite alla durata minima del ciclo semaforico.

2.4.4) Il ritardo nelle intersezioni semaforizzate.

Prima di poter trattare la metodologia che ci consente di determinare il livello di servizio di una intersezione semaforizzata è necessario studiare i fenomeni di ritardo che si hanno in corrispondenza di essa; il "ritardo" è infatti uno dei principali indicatori delle prestazioni dell'intersezione.

Il ritardo può essere definito in una serie di modi diversi; per i nostri scopi interessa il "**ritardo medio di fermata**", che è il rapporto tra la somma dei tempi trascorsi dai veicoli fermi in un ramo di accesso in un dato periodo di tempo ed il volume di traffico in arrivo a quel ramo nello stesso intervallo; si esprime usualmente in s/veic.

Le formule proposte per il calcolo del ritardo da diversi autori sono molteplici; noi tratteremo solo quelle più utilizzate nella pratica.

Bisogna distinguere due casi:

- **accessi sottosaturi**: la domanda è minore della capacità degli accessi ($v/c < 1$);
- **accessi sovrasaturi**: la domanda è maggiore della capacità degli accessi ($v/c > 1$).

Nel caso di accessi sottosaturi una formula attendibile è quella proposta da Webster [1.4]:

$$d = \frac{C \cdot [1 - (g/C)]^2}{2 \cdot [1 - (v/s)]} + \frac{(v/c)^2}{2 \cdot v \cdot [1 - (v/c)]} - 0.65 \cdot (c/v^2)^{1/3} \cdot (v/c)^{2+(g/C)}$$

Il primo addendo è l'espressione del ritardo per arrivi uniformi; il secondo termine incrementa i valori del ritardo per tener conto della influenza della componente casuale degli arrivi; il terzo addendo, di derivazione sperimentale, contribuisce ad una correzione (in diminuzione) della lieve sovrastima comportata dalla considerazione dei soli due primi termini di derivazione teorica. In effetti il terzo termine riduce il ritardo calcolato con i soli primi due del 5###15 ###, per cui può essere più semplicemente sostituito applicando un fattore pari a 0,9 ai primi due termini:

$$d = 0.90 \cdot \left\{ \frac{C \cdot [1 - (g/C)]^2}{2 \cdot [1 - (v/s)]} + \frac{(v/c)^2}{2 \cdot v \cdot [1 - (v/c)]} \right\}$$

La formula di Webster è valida solo per valori del rapporto $v/c < 1$; per v/c che tende ad 1 il ritardo tende ad infinito. E' evidente che tale formula non è utilizzabile per accessi sovrasaturi, nè dà risultati attendibili quando v/c è maggiore di 0,8.

Per tale motivo sono state proposte diverse formule che consentono il calcolo del ritardo all'intersezione anche per quelle intersezioni che sono prossime alla saturazione o sovrasature. In appendice, trattando il livello di servizio delle intersezioni semaforizzate, riporteremo la formula consigliata dall'*HCM 1994* per il calcolo del ritardo all'intersezione; essa, per valori medi delle condizioni di progressione semaforica che si possono avere, è la seguente:

$$d = 0,38 \cdot C \cdot \frac{[1 - (g/C)]^2}{1 - (g/C) \cdot X} + 173 \cdot X^2 \cdot \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{16 \cdot X}{c}} \right]$$

tale formula è ritenuta valida fino a $v/c=1,2$.

A) Esempio.

Calcoliamo, con la formula dell'*HCM* sopra riportata, il ritardo medio all'intersezione per i due accessi più carichi dell'intersezione progettata nell'esempio del paragrafo 2.4.2. In questa formula $X = v/s$ e $c = s$ per i vari accessi.

$$d_3 = 0,38 \cdot 70 \cdot \frac{[1 - (27/70)]^2}{1 - (27/70) \cdot 0,38} + 173 \cdot 0,38^2 \cdot \left[(0,38 - 1) + \sqrt{(0,38 - 1)^2 + \frac{16 \cdot 0,38}{2500}} \right] = 12 \text{ sec/ veic}$$

$$d_2 = 0,38 \cdot 70 \cdot \frac{[1 - (31/70)]^2}{1 - (31/70) \cdot 0,45} + 173 \cdot 0,45^2 \cdot \left[(0,45 - 1) + \sqrt{(0,45 - 1)^2 + \frac{16 \cdot 0,45}{2240}} \right] = 11 \text{ sec/ veic}$$