



MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI

SISTEMI DI REGOLAZIONE DEL TRAFFICO

LINEE GUIDA

Documento approvato dalla Commissione di studio per le norme relative ai materiali stradali e progettazione, costruzione e manutenzione strade del CNR

ISPettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale



GRUPPO DI LAVORO



Ministero dei Lavori Pubblici
Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale

Coordinatore: Pasquale Cialdini
Corrado Loschiavo
Silverio Antoniazzi



Università degli Studi di Salerno
Dipartimento di Ingegneria Civile

Coordinatore: Giulio Erberto Cantarella



Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria Civile

Coordinatore: Roberto Camus

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. SISTEMI di regolazione semaforica del traffico	2
1.1. Strategie di regolazione semaforica	2
1.2. Opportunità della regolazione semaforica	5
2. LA PROGETTAZIONE DI un sistema di regolazione semaforica	7
2.1. Acquisizione dei dati di progetto	9
2.2. Analisi delle correnti	11
2.2.1. Determinazione dei tempi di giallo	11
2.2.2. Determinazione dei tempi di sicurezza	11
2.3. Struttura del piano semaforico	14
2.3.1. Definizione delle fasi	14
2.3.2. Transizioni di fase	18
2.4. Calcolo del piano semaforico	19
2.4.1. Piano semaforico di una singola intersezione	19
2.4.2. Determinazione della durata del ciclo	21
2.4.3. Determinazione dei tempi di verde	22
2.4.4. Determinazione dei tempi di rosso	22
2.4.5. Piano semaforico di una rete di intersezioni	23
2.5. Valutazione	23
2.5.1. Analisi delle condizioni di saturazione di una intersezione ..	23
2.5.2. Analisi del ritardo per una intersezione semaforizzata	24
2.5.3. Valutazione ex-ante	25
2.5.4. Valutazione ex-post	26
3. ELABORATI DEL PROGETTO	27
4. APPENDICE A	29
5. APPENDICE A	34
Definizioni relative alla geometria delle intersezioni	35
Definizioni relative al movimento degli utenti	35
Definizioni relative alla regolazione semaforica	37

6.	APPENDICE B	41
7.	APPENDICE C	45
8.	APPENDICE D	48
	Caratteristiche delle corsie	49
	Caratteristiche degli elementi di separazione delle correnti.....	51
	Linee di attestamento	52
	Segnaletica orizzontale	53

INTRODUZIONE

Le intersezioni (o incroci) di una rete stradale sono quei punti in cui si ha la confluenza di diversi rami stradali. Le traiettorie seguite dagli utenti, veicoli o pedoni, nell'attraversamento dell'incrocio possono tra di loro intrecciarsi in alcuni punti (*punti di conflitto*) che, oltre a creare intralcio alla circolazione delle diverse correnti di traffico interessate, determinano problemi di sicurezza. Si rende pertanto necessario limitare la presenza di detti punti di conflitto all'interno dell'intersezione attraverso un'opportuna regolazione delle manovre. In funzione delle modalità di regolazione, in ordine crescente di costo ed efficacia, si possono classificare le intersezioni in:

- intersezioni con regole di precedenza (a destra);
- intersezioni con regole di priorità (segnaletica fissa);
- intersezioni semaforizzate, nelle quali il diritto di impegnare l'intersezione è regolato da appositi segnali;
- intersezioni a livelli sfalsati.

Soprattutto in ambito urbano dove la densità delle intersezioni è elevata, la mancanza di spazi, unita ai notevoli costi di realizzazione e all'impatto sull'ambiente escludono, salvo casi particolari, la possibilità di realizzare intersezioni a livelli sfalsati.

Le presenti norme si riferiscono alla progettazione funzionale¹ dei sistemi di regolazione delle intersezioni semaforizzate² e si articolano in tre capitoli, oltre ad allegati con elementi informativi e indicazioni utili per la progettazione. In particolare i capitoli del testo sono:

- 1. Sistemi regolazione semaforica.**
- 2. La progettazione di un sistema di regolazione semaforica.**
- 3. Elaborati del progetto.**

Gli allegati sono:

- **Appendice A**, che riporta un glossario di termini tecnici.
- **Appendice B**, che riporta alcune indicazioni sul calcolo del flusso di saturazione.
- **Appendice C**, che riporta un esempio di coordinamento di una rete di intersezioni semaforizzate.
- **Appendice D**, che riporta alcune considerazioni sulle relazioni tra regolazione semaforica e geometri dell'intersezione.

¹ Gli aspetti progettuali geometrici sono, invece, oggetto di altre indicazioni normative.

² Le considerazioni che seguono possono essere applicate anche agli impianti di regolazione semaforica utilizzati per gestire sensi unici alternati stabili, o dovuti a temporanei restringimenti della carreggiata.

1. SISTEMI DI REGOLAZIONE SEMAFORICA DEL TRAFFICO

La regolazione semaforica è la tecnica usualmente adottata per gli incroci caratterizzati da flussi rilevanti, tali cioè da non rendere efficace l'adozione di regole di precedenza o di priorità, nelle circostanze nelle quali non è possibile realizzare una intersezione a livelli sfalsati (di solito nei contesti urbani). Questa tecnica consente di aumentare la sicurezza dell'incrocio riducendo i punti di conflitto delle traiettorie dei veicoli e consente inoltre di:

- contenere i tempi medi di attesa alle intersezioni;
- evitare l'insorgere di condizioni di blocco dell'intersezione;
- ridurre la lunghezza delle code evitando il diffondersi della congestione ad altre intersezioni;
- garantire la precedenza a particolari classi di utenti, quali ad esempio mezzi di trasporto collettivo e/o pedoni;
- contenere il consumo di carburante e le emissioni di inquinanti, riducendo i tempi medi di permanenza dei veicoli nella rete.

La regolazione semaforica svolge, inoltre, un importante ruolo di supporto all'implementazione di schemi di circolazione consentendo di privilegiare alcuni itinerari, di controllare l'accesso ad alcune zone circoscritte del territorio urbano e, più in generale, di facilitare l'utente nella percezione della gerarchia definita tra gli assi stradali.

1.1. Strategie di regolazione semaforica

I sistemi di regolazione possono essere classificati rispetto alle strategie adottate dal sistema di controllo per la determinazione dei parametri di regolazione (oltre alla possibilità di controllo manuale da parte di un operatore umano).

Strategie basate sulla conoscenza esplicita dei flussi

Nelle *strategie di regolazione semaforica basate sulla conoscenza esplicita dei flussi*, i parametri caratteristici dei piani semaforici sono calcolati sulla base dei valori di flusso³. Tali strategie possono essere ulteriormente suddivise in:

Strategie a catena aperta, in cui si adottano piani predeterminati fuori linea (off-line) a partire da dati "storici" sulle condizioni di traffico prevalenti, inserendo eventualmente, ad orario o manualmente, piani diversi in diversi periodi del giorno.

³ Sono disponibili numerosi metodi per la implementazione delle strategie basate sulla conoscenza esplicita dei flussi, oltre al ben noto, anche se di uso limitato, metodo di Webster.

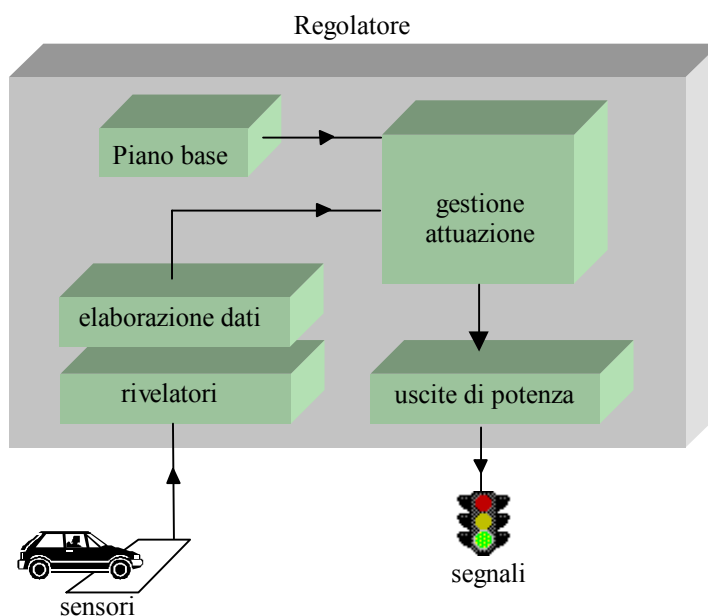
Strategie a catena chiusa, in cui i parametri di regolazione dei piani sono calcolati sulla base di opportune misure dei flussi effettuate in tempo reale (on-line), (si vedano le linee guida per il monitoraggio del traffico). Tali misure possono essere quindi utilizzate

- per individuare un particolare piano di regolazione da una biblioteca di piani predefiniti, nel qual caso si ha una strategia a *selezione piano*;
- per calcolare in linea tutti i parametri del piano, e si ha una strategia a *elaborazione di piano*.

Si noti che in entrambi i casi le misure di flusso si riferiscono ad un intervallo di campionamento trascorso ed è inoltre necessario considerare i tempi di elaborazione per individuare il piano da inserire o per calcolarne i parametri. Ciò comporta un ritardo nell'adozione del piano rispetto alle situazioni di traffico per cui sarebbe opportuno utilizzare tecniche di estrapolazione statistica per la determinazione dei flussi da utilizzare nel calcolo della regolazione.

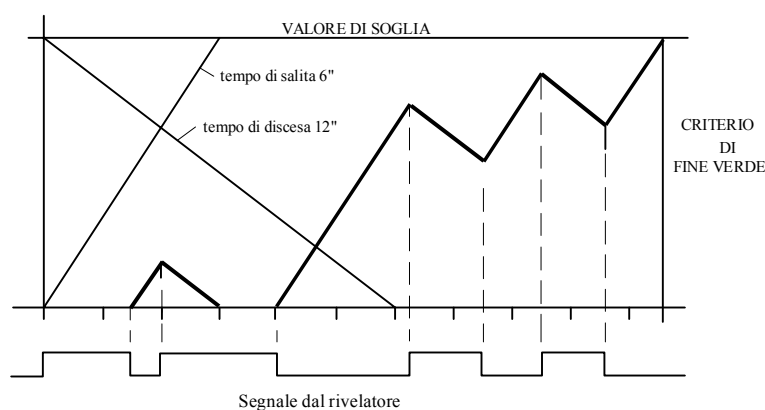
Strategie attuate dai veicoli

Le *strategie di regolazione semaforica attuate dai veicoli* si differenziano notevolmente da quelle precedentemente descritte, poiché la determinazione dei parametri di regolazione prescinde dalla conoscenza esplicita dei flussi di arrivo (siano essi rilevati dinamicamente o calcolati da dati storici). L'alternanza dei segnali verde e rosso ai differenti accessi dell'intersezione è determinata direttamente (on-line) dall'arrivo dei veicoli, segnalato al regolatore da opportuni sensori (vedi figura).



Schema funzionale di un regolatore attuato dal traffico

I metodi *con sequenza delle fasi predeterminata* utilizzano una struttura predeterminata del piano semaforico, le cui temporizzazioni sono gestite sulla base dei veicoli rilevati dai sensori. In pratica ciascuna fase nella struttura può essere di durata variabile fra un tempo minimo ed un tempo massimo. In questa categoria di strategie rientrano i vari sistemi comunemente indicati come *parzialmente attuati* o *semiattuati*, in cui soltanto alcune delle fasi vengono gestite in funzione dei veicoli mentre le altre mantengono una durata preimpostata. Il prolungamento del tempo di verde di una fase può essere effettuato con modalità diverse: ciascun veicolo può determinare all'atto del passaggio sul sensore un prolungamento costante o variabile in funzione del numero dei veicoli già transitati, al fine di considerare il comportamento dinamico delle code. In figura seguente è riportata a titolo esemplificativo un prolungamento basato sul volume e sull'occupazione. Il criterio di fine verde viene raggiunto con l'azione combinata di due effetti: la durata degli intervalli fra veicoli e la durata della presenza di un veicolo sul sensore, ovviamente con il limite di durata massima consentita per la fase in corso.



Esempio di gestione del prolungamento del verde

I metodi *completamente attuati* non richiedono la definizione di una struttura, per cui viene rimossa l'assunzione limitativa che la successione delle fasi sia predeterminata. In tali metodi sono definite o generate in linea le fasi possibili e le transizioni ammesse fra tali fasi e vengono formulate le regole di commutazione da una fase all'altra e di permanenza nella fase. Questi metodi, sviluppati inizialmente per intersezioni isolate, possono essere applicati anche a reti di intersezioni all'interno di una struttura *ad intelligenza distribuita*, in cui ogni regolatore dialoga con i regolatori adiacenti, o *ad intelligenza centrale*, in cui ogni regolatore dialoga con una centrale. In questo ultimo caso è possibile integrare il sistema di regolazione semaforica con altri sistemi quali quello di monitoraggio del traffico stradale, del trasporto collettivo ed eventuali sistemi di informazione agli utenti.

1.2. Opportunità della regolazione semaforica

La regolazione semaforica non implica necessariamente un miglioramento nell'efficienza, in termini di tempi medi di attesa all'intersezione. La valutazione in merito all'introduzione o meno del sistema di controllo semaforico deve essere quindi condotta con specifico riferimento ad ogni situazione particolare. I criteri guida in tale decisione possono essere legati fundamentalmente a:

- problemi di sicurezza;
- problemi di capacità.

Una valutazione in merito alla pericolosità dell'intersezione in assenza di regolazione può essere condotta sulla base di opportune analisi delle rilevazioni di incidenti avvenuti nell'area dell'intersezione in esame. Per quanto concerne la capacità dell'intersezione, è necessario misurare l'entità dei flussi in arrivo all'intersezione e valutare quindi il funzionamento dell'intersezione in presenza o meno di un sistema di regolazione. In generale, una delle grandezze, che si prestano per la valutazione della maggiore o minore efficienza del sistema, è rappresentata dal ritardo medio per veicolo, calcolato considerando il numero totale di veicoli in ingresso nell'intersezione. Numerosi studi sono stati condotti per la quantificazione del ritardo medio per veicolo in presenza e in assenza della regolazione.

Per valori sufficientemente ridotti dei flussi in ingresso, la disciplina a priorità comporta un ritardo inferiore rispetto al caso caratterizzato dalla presenza di regolazione, mentre all'aumentare del flusso, superata una soglia di sostanziale equivalenza dei ritardi sia in presenza che in assenza di controllo, si verifica una condizione inversa: quando cioè il ritardo medio nelle intersezioni a priorità raggiunge valori molto elevati, la presenza della regolazione consente di ottenere valori ancora relativamente accettabili per i ritardi ovvero di sopportare un flusso maggiore a parità di ritardo medio per veicolo, oltre a garantire un più elevato standard in termini di sicurezza.

In accordo con quanto appena esposto, l'introduzione della regolazione semaforica in una determinata intersezione deve essere il risultato di uno studio e di una valutazione che richiedono un approccio metodologico rigoroso. Inoltre, la realizzazione di un sistema semaforico può rivelarsi utile per il raggiungimento di altri obiettivi importanti, non strettamente connessi con la configurazione specifica dell'intersezione. In particolare, la Direttiva per la redazione, adozione ed attuazione dei piani urbani del traffico, emanata dal Ministero dei Lavori Pubblici nel 1995, indica tra gli altri obiettivi fondamentali del PUT anche:

- il miglioramento delle condizioni della circolazione;
- la riduzione dell'inquinamento atmosferico ed acustico.

In prima approssimazione si può ragionevolmente affermare che la realizzazione di interventi volti al miglioramento delle condizioni della

circolazione (cfr. il primo degli obiettivi citati dalla direttiva) determina parallelamente anche una riduzione dell'inquinamento in ambito urbano, a seguito della riduzione del numero di veicoli costretti a fermarsi ovvero a procedere con marcia lenta ed episodica. Più in generale risulta necessario valutare l'intersezione da regolare come elemento del sistema più ampio, costituito dalla rete della viabilità cittadina.

Infine va ricordato che il sistema semaforico costituisce solo uno dei sistemi che concorrono alla gestione della mobilità nelle aree urbane: ad esso si affiancano infatti altri sistemi, quali quelli di gestione centralizzata dei mezzi di trasporto pubblico, di guida al parcheggio, di informazione all'utenza, sia prima dell'effettuazione del tragitto sia nel corso dello spostamento (messaggi variabili, route guidance, ecc.), di controllo di accesso alle zone di maggiore attrattività (road pricing), di rilevamento dell'inquinamento, ecc. (Si vedano anche le norme sui sistemi per la rilevazione del traffico e su quelli per l'informazione agli utenti).

La scelta del sistema di regolazione semaforica più appropriato deve essere operata in stretto rapporto con le condizioni di traffico rilevanti, con l'ambito in cui si opera e con le risorse disponibili.

Le *strategie basate sulla conoscenza esplicita dei flussi* presentano costi crescenti di hardware passando da strategie a *piani predefiniti* a strategie *attuati dai flussi a selezione piano*, a quelle *attuati dai flussi a elaborazione di piano*. Infatti le strategie attuate dai flussi richiedono l'adozione di un sistema di rilevazione automatica dei flussi stessi, particolarmente esteso nel caso di strategie ad elaborazione di piano. Sono richiesti, inoltre, sistemi di calcolo in grado di operare in tempi molto ridotti. Le strategie attuate dai flussi consentono, d'altro canto, un migliore adeguamento alle condizioni effettive di traffico anche se nel caso di notevole congestione si possono avere brusche oscillazioni della regolazione con conseguente degrado delle prestazioni complessive del sistema.

Si adotta di solito una regolazione semaforica che tende a ridurre il tempo totale di attesa (minimizzazione del ritardo totale). In presenza di notevoli livelli di congestione si determina il piano di regolazione di ciascuna intersezione in modo da rendere massimo il numero di utenti che può attraversare l'intersezione (massimizzazione della capacità), quindi si determina il piano di coordinamento in modo da ridurre il tempo totale di attesa (minimizzazione del ritardo totale). Nel caso di reti in condizioni di sovrasaturazione è possibile adottare strategie di allocazione delle code per evitare la diffusione della congestione a causa del blocco progressivo delle altre intersezioni a monte.

Le *strategie attuate dai veicoli* sono, invece, particolarmente efficaci per intersezioni isolate non molto congestionate. Infatti, per elevati valori di flusso forniscono una regolazione determinata dai valori massimi di durata del periodo di verde (simile a quella di una strategia a piani predefiniti). Affinché risultino efficaci anche nel caso di intersezioni non isolate, queste strategie devono essere inserite in un più generale sistema di controllo del traffico.

2. LA PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI REGOLAZIONE SEMAFORICA

Costituiscono oggetto della progettazione gli elementi atti a definire compiutamente le caratteristiche funzionali del sistema di regolazione semaforica. Il progetto dovrà fornire tutti gli elaborati necessari per una completa rappresentazione del sistema di regolazione semaforica in tutti i suoi componenti tecnici e di costo; del progetto faranno parte:

- *una relazione tecnica*, a carattere descrittivo, esplicativo e giustificativo. A partire dalle caratteristiche dell'intersezione da regolare, la relazione deve riportare una descrizione delle caratteristiche strutturali, funzionali e di costo del sistema di regolazione semaforica progettato;
- *elaborati grafici a varie scale*, in grado di evidenziare elementi costitutivi del sistema di regolazione semaforica;
- *diagrammi degli schemi di regolazione*, contenente indicazioni circa gli intervalli temporali e la durata delle fasi in cui la regolazione è articolata.

Il progetto di un piano semaforico richiede l'effettuazione di una serie di passi sintetizzati in figura e sinteticamente descritti qui di seguito. Gli aspetti normativi relativi ai vari passi saranno illustrati dettagliatamente nei paragrafi seguenti, senza entrare nel merito delle metodologie di progettazione.

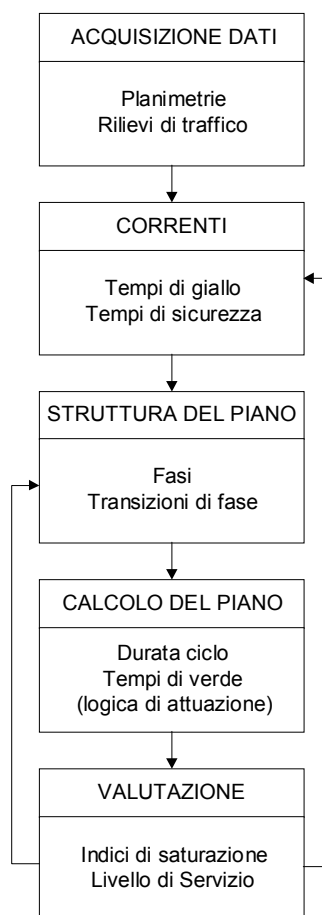
Acquisizione dei dati

Supponendo che la geometria dell'intersezione sia definita, il primo passo consiste nell'acquisizione di tutti i dati necessari alla progettazione. In particolare è necessario acquisire i dati geometrici, utilizzando planimetrie in scala opportuna, e quelli relativi ai flussi di traffico, distinti per ciascuna manovra. La raccolta di tali dati, che devono essere completi ed aggiornati, può richiedere la realizzazione di sistema di monitoraggio del traffico o l'uso di un sistema già esistente.

Analisi delle correnti

I dati geometrici e quelli relativi ai flussi di traffico vengono utilizzati per individuare il numero di corsie di ciascun attestamento e la loro funzione in rapporto alle manovre da effettuare. Si individuano così le correnti nelle quali si considera suddiviso il traffico in arrivo e quindi i segnali semaforici che le controllano. Per ciascuna corrente di traffico si valuta poi il tempo di transizione di giallo tra il verde ed il rosso, sulla base delle caratteristiche di ciascuna corrente (veicolare, pedonale, ecc.).

L'individuazione delle coppie di correnti antagoniste consente infine di valutare per ciascuna di esse il tempo di sicurezza, che deve essere assicurato tra la fine del verde di una corrente e l'inizio del verde di quella antagonista, per evitare rischi di collisione fra i veicoli che devono sgomberare l'area di conflitto alla fine del verde prima del sopraggiungere dei veicoli della corrente antagonista, che partono all'inizio del verde.



Schema del processo di progettazione

Struttura del piano semaforico

Indipendentemente dalla tipologia del controllo, il progetto prosegue quindi, in generale, con lo studio della struttura del piano semaforico con l'obiettivo della sicurezza per le correnti (veicolari, pedonali, ecc.) che attraversano l'intersezione, tenendo conto delle norme del codice della strada e di altre condizioni al contorno.

La struttura del piano si ricava individuando il numero e la composizione delle fasi semaforiche, tenendo conto delle esigenze di capacità dell'intersezione e di tutte le necessità delle singole correnti veicolari, con particolare attenzione per pedoni, ciclisti e mezzi pubblici. Ciascuna fase è definita dall'insieme di correnti mutuamente compatibili, e quindi dai segnali che le controllano, cui verrà assegnato il verde simultaneamente in uno o più intervalli del ciclo semaforico. I singoli segnali possono non iniziare o finire simultaneamente per effetto di tempi di sicurezza di diversa durata. Il passaggio da una fase ad un'altra avviene dunque attraverso una transizione di fase, caratterizzata dal tempo fra l'istante in cui commuta al rosso il primo segnale della fase uscente e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante.

Per la definizione delle fasi devono dunque essere individuate:

- le *correnti compatibili*, che non presentano aree di conflitto in comune e possono essere raggruppate in una fase,
- le *correnti antagoniste*, che devono appartenere a fasi separate (ad eccezione del caso di correnti in svolta prive di apposito segnale, che possono essere considerate come correnti compatibili condizionate).

Il numero di fasi dipende dal modo con cui sono raggruppate nelle singole fasi le correnti veicolari, tenuto conto della sicurezza, delle intensità dei flussi e di altri problemi legati ad esempio al coordinamento con impianti adiacenti. La successione delle fasi può essere determinata in modo da massimizzare la capacità dell'intersezione, o in base ad altre considerazioni che saranno riprese nel capitolo seguente.

Calcolo del piano semaforico

Il calcolo della durata del ciclo semaforico e dei tempi di verde dei vari segnali viene effettuato sulla base dei risultati ottenuti nei passi precedenti, utilizzando in particolare i dati relativi ai flussi e valutando il flusso di saturazione per ciascuna corrente e per tutti gli attestamenti. Il piano semaforico viene normalmente rappresentato sotto forma di *diagramma di temporizzazione* (vedi figura 2.4). Nel caso di controllo di tipo attuato dal traffico il piano va calcolato con riferimento alle condizioni di massimo carico dell'intersezione ed in tale caso è necessario inoltre allegare al progetto anche la descrizione del funzionamento della logica di controllo. Nel caso infine di reti di intersezioni il progetto deve contenere anche i *diagrammi di coordinamento* della rete.

Valutazione

L'ultimo passo della progettazione consiste nella valutazione di tutti gli indicatori atti a misurare l'efficienza delle ipotesi progettuali di regolazione per l'intersezione. In particolare deve essere condotta un'analisi delle condizioni di saturazione dell'intersezione ed una valutazione dei ritardi accumulati dai veicoli con conseguente stima del Livello di Servizio. Qualora i risultati della valutazione non fossero soddisfacenti è necessario riconsiderare i vari passi della progettazione, modificando le ipotesi sia per quanto riguarda l'utilizzo delle corsie e l'accorpamento delle manovre in correnti, sia per la composizione delle fasi e le temporizzazioni del ciclo e dei singoli segnali.

2.1. Acquisizione dei dati di progetto

Caratteristiche geometriche

Per l'esecuzione di un progetto di semaforizzazione è necessario acquisire gli elementi geometrici che consentono di definire il comportamento dell'intersezione nella rete, di definire le caratteristiche geometriche degli

attestamenti dell'intersezione (oggetto di altre norme, vedi anche appendice A.3) e tutti gli altri elementi utili alla collocazione delle componenti semaforiche necessarie.

In generale è necessario far riferimento a due planimetrie (vedi oltre elaborati di progetto):

planimetria d'insieme:

la planimetria di insieme deve consentire di inquadrare la posizione dell'intersezione nella rete stradale e riportare la posizione degli impianti semaforici adiacenti;

planimetria dell'intersezione (scala 1:200 – 1:500):

la planimetria dell'intersezione deve contenere tutte le informazioni dettagliate necessarie per il progetto, quali: delimitazioni delle carreggiate, percorsi pedonali e ciclabili, edifici, passi carrai, alberi, pali, idranti, pozzetti, armadi, pendenze, segnaletica orizzontale e verticale ed altri arredi.

Dati di traffico

I flussi di utenti in arrivo, necessari per la progettazione, devono essere acquisiti attraverso conteggi effettuati per ciascuna corrente di traffico e suddivisi per tipologia dei mezzi. Nel caso in cui più corsie siano disponibili per una corrente di traffico è opportuno individuare il flusso di ciascuna corsia, per poter individuare il coefficiente di utilizzo delle singole corsie.

I conteggi dovrebbero essere effettuati in modo da ottenere l'andamento del traffico nei diversi periodi della giornata. In generale è opportuno effettuare i conteggi su un arco di 16 ore, per giornata (con un minimo delle 6 ore di maggior carico, se le risorse a disposizione non consentono conteggi per l'intero periodo di 16 ore) e di campionare i dati ad intervalli non superiori ai 15 minuti. Nel caso di intersezioni già semaforizzate si raccomanda di utilizzare il ciclo semaforico come intervallo di campionamento. Qualora si preveda l'uso di un controllo attuato dal traffico, l'intervallo di campionamento suggerito è il minuto. E' necessario acquisire anche i dati di traffico relativi a giorni della settimana che presentano comportamenti particolari.

E' opportuno esprimere i flussi in unità autovetture equivalenti (Ae): in pratica i veicoli diversi dalle autovetture possono essere riportati in unità omogenee attraverso opportuni coefficienti di equivalenza; vedi tabella in appendice. Qualora si utilizzino valori diversi, gli stessi devono essere chiaramente evidenziati nel progetto.

La serie storica degli incidenti verificatisi in corrispondenza dell'intersezione deve costituire il punto di partenza per analizzare la tipologia degli interventi da adottare, che possono riguardare sia la geometria dell'intersezione, sia la verifica della convenienza di installare un impianto semaforico ovvero di modificare le caratteristiche di un impianto semaforico esistente.

2.2. Analisi delle correnti

In funzione delle caratteristiche geometriche dell'intersezione e dell'entità dei flussi, è possibile individuare il numero di corsie di ciascun attestamento e la corrispondente larghezza. Le varie manovre che gli utenti effettuano in uscita dall'attestamento devono quindi essere attribuite alle diverse corsie, in modo da individuare univocamente la loro funzione. Successivamente si raggruppano le corsie in modo da definire le correnti nelle quali si considera diviso il traffico in arrivo e quindi i segnali semaforici che le controllano. Il numero di corsie, il loro utilizzo per le diverse manovre e la definizione delle correnti rientrano fra le ipotesi di progetto che devono essere verificate ed eventualmente modificate, qualora la valutazione dell'efficienza della regolazione progettata non sia soddisfacente.

2.2.1. Determinazione dei tempi di giallo

Il tempo di giallo dipende dalla massima velocità consentita per i veicoli motorizzati in arrivo ad un determinato accesso e comunque non può essere inferiore ai 3 secondi. I tempi di giallo g suggeriti sono riportati nella seguente tabella.

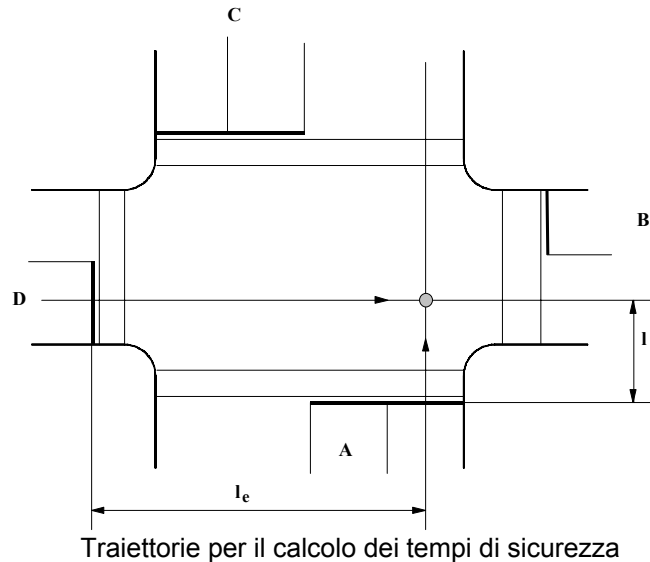
v (km/h)	g (sec)
50	3
60	4
70	5

In un'intersezione i tempi di giallo possono essere diversi se i limiti di velocità sono diversi per le correnti in ingresso. In presenza di traffico pesante conviene utilizzare lo sgombero di 4 secondi anche con velocità limite di 50 Km/h. Per particolari movimenti che vengono effettuati a velocità inferiore a quella limite (ad esempio svolte a destra), possono essere utilizzati i tempi corrispondenti alla velocità effettiva dei veicoli, e comunque non inferiori ai 3 secondi. Nel caso di piste ciclabili semaforizzate il tempo di giallo dovrebbe essere di norma pari a 2 secondi. Nel caso di attraversamenti pedonali il tempo di giallo deve essere di durata pari al tempo necessario al pedone per effettuare l'attraversamento completo o comunque necessario per portarsi in una zona protetta (salvagente). Il tempo va calcolato sulla base della lunghezza della mezzeria dell'attraversamento, considerando di norma una velocità media per i pedoni compresa fra 1 e 1,5 m/s. La velocità superiore è da utilizzarsi nei casi di attraversamenti che non presentino particolari problemi per quanto riguarda l'entità dei flussi pedonali, la loro visibilità e la velocità dei veicoli.

2.2.2. Determinazione dei tempi di sicurezza

I tempi di sicurezza devono essere calcolati sulla base della geometria dell'intersezione e sulla base di ipotesi cautelative sulle velocità con cui i veicoli escono dall'intersezione alla fine del verde e rispettivamente entrano nell'intersezione all'inizio del verde.

Il tempo di sicurezza viene dunque calcolato sulla base dell'intersezione tra due traiettorie, quella di uscita e quella di ingresso, facilmente determinabili sulla base della planimetria dell'intersezione. Nella figura è riportato l'esempio di un'intersezione semplice, in cui sono evidenziate le traiettorie utilizzate per il calcolo dell'intervallo necessario fra la fine del verde per la corrente D e l'inizio del verde per la corrente A.



Il tempo di sicurezza t_s viene determinato come somma algebrica di tre tempi

- t_u tempo di uscita
- t_e tempo di sgombero
- t_i tempo di ingresso

secondo l'espressione:

$$t_s = t_u + t_e - t_i$$

Il tempo di uscita corrisponde al tempo dopo la fine del verde, durante il quale i veicoli possono ancora uscire, per effetto del segnale giallo. Il tempo di sgombero è quello necessario perché il veicolo in uscita superi completamente il punto di conflitto. Il tempo di ingresso è quello necessario ad un veicolo che sopraggiunge sulla direzione antagonista per percorrere lo spazio fra la linea d'arresto e il punto di conflitto. I tempi di sgombero e di ingresso vanno calcolati sulla base delle relative distanze e delle velocità medie necessarie per percorrerle.

I tempi di sicurezza devono essere calcolati per tutte le coppie di correnti in conflitto (pedoni, ciclisti, mezzi pubblici, veicoli, ecc.). L'insieme di tali tempi viene rappresentato dalla matrice dei tempi di sicurezza $T_s = [t_{sij}]$ il cui generico elemento t_{sij} è il massimo tempo di sicurezza fra la fine del verde del segnale i e l'inizio del verde del segnale j . Il tempo di sicurezza non può essere comunque inferiore alla durata del giallo incrementata di 1 secondo (cfr. § 6.2).

Determinazione dei tempi di uscita

Il tempo di uscita t_u è quello fra la fine del verde di un segnale e l'inizio del tempo di sgombero: esso dipende fundamentalmente dalla velocità dei veicoli in arrivo e dalle loro caratteristiche di decelerazione. I valori suggeriti per la valutazione di t_u e per le velocità da considerare nello sgombero sono riportati nella seguente tabella

Corrente in uscita	Velocità (km/h)	t_u
Veicoli che procedono diritto	36	3
Veicoli in svolta (raggio ≥ 10 m)	25	2
Veicoli in svolta (raggio < 10 m)	18	2
Tram o Bus senza fermata prima dell'intersezione	≤ 30	3
	$30 \div 50$	5
	$50 \div 70$	7
Tram o Bus con fermata prima dell'intersezione (*)	V_{max}	0
Biciclette	14	1
Pedoni	$3,5 \div 5,5$	0

(*) se effettuano la fermata in corrispondenza dell'intersezione, il tempo di sgombero è calcolato sulla base dell'accelerazione e della massima velocità raggiungibile. Si può considerare un'accelerazione compresa fra 0,7 e 1,2 m/s^2 per i tram e fra 1,0 e 1,5 m/s^2 per i bus.

Determinazione dei tempi di sgombero

Per la determinazione delle lunghezze dei percorsi di sgombero si fa di norma riferimento all'asse delle corsie o degli attraversamenti pedonali.

La distanza di sgombero è costituita da due elementi:

- la lunghezza fra la linea di arresto e il punto di conflitto più sfavorevole (più distante) l_e ;
- la lunghezza fittizia l_v del veicolo in fase di sgombero. Tale lunghezza non corrisponde all'effettiva lunghezza del veicolo, in quanto si suppone che i veicoli di elevate dimensioni vengano percepiti più chiaramente da chi impegna l'intersezione. Generalmente si possono considerare le seguenti lunghezze fittizie:

Tipi di veicolo	l_v (m)
Cicli	0
Veicoli sia leggeri che pesanti	6
Tram	15

Il tempo di sgombero t_e viene calcolato sulla base della distanza da percorrere e delle velocità media di percorrenza: $t_e = (l_e + l_v)/v_m$.

Determinazione dei tempi di ingresso

Per la determinazione delle lunghezze dei percorsi di ingresso si fa di norma riferimento all'asse delle corsie o degli attraversamenti pedonali.

La distanza di ingresso l_i va determinata per i veicoli fra la linea di arresto e il punto di conflitto più sfavorevole (più vicino), sull'asse della traiettoria veicolare in conflitto ovvero all'inizio della zona di attraversamento pedonale. Per gli attraversamenti pedonali la distanza è quella fra l'inizio dell'attraversamento e l'inizio dell'area di conflitto: nella maggioranza dei casi tale distanza è da considerarsi nulla.

Il tempo di ingresso t_i è quello necessario per percorrere il tratto l_i .

Per veicoli leggeri si suppone che il primo veicolo percorra tale tratto ad una velocità media di 40 km/h per cui:

$$t_i = (l_i \cdot 3,6)/40 \quad [\text{s}]$$

Nel caso di mezzi pubblici si considerano due casi: se la fermata non si trova prima dell'intersezione si suppone che i veicoli arrivino con una velocità di $v_o=20$ km/h ed accelerino fino alla velocità massima, in caso di fermata si suppone invece che i veicoli partano da velocità nulla ($v_o=0$), con accelerazione dell'ordine di un metro al sec^2 .

Le biciclette che utilizzano il segnale veicolare non modificano il tempo valido per i veicoli, data la bassa accelerazione e velocità. Nel caso in cui sia prevista una pista ciclabile controllata da uno specifico segnale si suppone che la velocità media sia pari a 18 km/h per cui:

$$t_i = (l_i \cdot 3,6)/5$$

Per i pedoni il tempo viene posto a zero se i veicoli possono passare nell'immediata vicinanza del marciapiede, altrimenti si può utilizzare un tempo di ingresso calcolato sulla base di 5,5 km/h:

$$t_i = (l_i \cdot 3,6)/1,5$$

Verifica dei tempi di sicurezza

Dopo la messa in servizio dell'impianto semaforico i tempi di sicurezza devono essere verificati attentamente osservando il funzionamento dell'impianto. In particolare devono essere analizzate con cura le svolte a sinistra ostacolate dal traffico opposto e i tempi effettivi di sgombero e di ingresso dei mezzi di trasporto pubblico.

2.3. Struttura del piano semaforico

2.3.1. Definizione delle fasi

La definizione delle fasi avviene in conformità a una suddivisione degli attestamenti dell'intersezione (esterni ed interni) in correnti. Per ciascuna corrente devono essere specificate le modalità d'uso delle rispettive corsie, che comportano in generale dei vincoli.

Ciascuna corrente è controllata da un segnale ed i segnali che controllano correnti non in conflitto possono essere raggruppati in modo da formare una fase. Il numero di fasi è, quindi, determinato sulla base della composizione delle singole fasi e della necessità di far defluire tutte le correnti di traffico. Nel caso di più di due fasi si presenta quindi il problema della determinazione della sequenza di attivazione delle singole fasi. Nota la sequenza delle fasi si

possono quindi progettare le transizioni di fase. Un problema particolare è rappresentato infine dalle manovre di svolta sia a sinistra che a destra che possono influire in modo significativo sulla organizzazione delle fasi.

Nel seguito vengono trattati brevemente i diversi problemi, al fine di evidenziare gli elementi che devono essere considerati nella loro soluzione.

Vincoli derivanti dall'uso delle corsie

Dalle modalità di utilizzo delle corsie per l'effettuazione delle diverse manovre discendono alcuni vincoli che devono essere rispettati nella definizione della fasatura di un'intersezione:

- *Vincolo di simultaneità*: il verde deve essere simultaneo per manovre veicolari distinte che utilizzano in modo promiscuo le stesse corsie (ad es. corsie utilizzate per più manovre quali dritto/destra o dritto/sinistra);
- *Vincolo di sequenzialità*: manovre veicolari distinte possono defluire in fasi diverse solo se utilizzano corsie specializzate;
- *Vincolo di ritardato inizio del verde*: il verde di una corrente con diritto di precedenza non può iniziare dopo quello di una corrente compatibile condizionata. Ad esempio un attraversamento pedonale che interferisce con una manovra di traffico veicolare di svolta a destra, non può iniziare dopo il verde assegnato alla manovra (dritto e/o) destra a meno che non si faccia uso di apposita segnalazione per avvisare i veicoli in svolta a destra della presenza di pedoni in attraversamento.

Numero di fasi

Al fine di massimizzare la capacità dell'intersezione è conveniente:

- determinare il numero di fasi minimo che garantisca comunque il deflusso delle varie manovre, evitando che queste producano interferenze con altre correnti di traffico;
- accorpate in una stessa fase correnti di traffico che richiedono tempi di verde di durata non troppo diversa;
- definire le fasi in modo da ridurre la somma dei tempi non utilizzati dalle correnti veicolari a causa degli intertempi di sicurezza o di altre necessità legate alle transizioni di fase.

Successione delle fasi

Nella scelta della successione delle fasi possono influire diverse considerazioni:

- una sequenza di fasi può essere determinata dall'esigenza di far attraversare l'intersezione da pedoni o cicli che devono impegnare due attraversamenti in successione;
- nel caso di intersezioni complesse la successione di fasi può essere determinata dalla necessità di far defluire alcune correnti in modo da smaltire le code, evitando che queste costituiscano ostacolo per altre correnti di traffico;
- una sequenza di fasi può essere determinata dalla possibilità di far defluire una corrente di traffico in più fasi, che devono pertanto essere consecutive;

- la presenza di un coordinamento con impianti adiacenti può condizionare in modo sensibile la scelta di una particolare sequenza di fasi;
- nel caso non si presenti alcuno dei condizionamenti precedentemente elencati, la sequenza delle fasi più conveniente è quella che consente di ottenere il ciclo minimo, considerando la sommatoria dei tempi persi.

Nel caso di piani a ciclo fisso, la successione delle fasi è rappresentata chiaramente dal *diagramma di temporizzazione*.

Nel caso di controllo attuato dal traffico le fasi e la successione delle fasi sono rappresentate da un diagramma di stato in cui a ciascuno stato corrisponde una fase ed a ciascuna transizione fra stati corrisponde una commutazione tra fasi. A ciascuno stato può essere associata la condizione logica di permanenza nella fase, mentre a ciascuna transizione può essere associata la condizione logica che determina il passaggio da una fase all'altra.

Svolte a sinistra

Nella definizione delle fasi, le svolte a sinistra costituiscono un problema particolare, in quanto presentano in generale un elevato numero di conflitti con altre correnti veicolari, e vanno pertanto studiate con particolare attenzione. Nel seguito vengono riportate le possibili soluzioni, con alcuni suggerimenti in merito alla loro adozione.

- Svolte a sinistra completamente protette

Una svolta a sinistra si dice protetta se durante il proprio tempo di verde i segnali che controllano tutte le correnti in conflitto (veicolari e non) sono al rosso. La realizzazione di una svolta a sinistra protetta risulta di particolare importanza qualora:

- il traffico sulla direzione opposta sia particolarmente veloce;
- il traffico sulla manovra di svolta debba essere fatto evacuare rapidamente
- il traffico di svolta o quello antagonista siano particolarmente intensi;
- vi sia scarsa visibilità nell'effettuare la manovra;
- il traffico in svolta debba fare attenzione ad una molteplicità di conflitti (tram, svolte a destra, pedoni, biciclette).

Nel caso in cui la svolta si effettui su più corsie di norma la svolta deve essere protetta.

- Svolte a sinistra parzialmente protette

Una svolta a sinistra si dice parzialmente protetta se i segnali che controllano le correnti in conflitto sono al rosso, soltanto durante una parte del proprio tempo di verde. In tale situazione, i veicoli in manovra possono passare liberamente nel periodo in cui sono protetti e devono rispettare le precedenza quando le correnti antagoniste sono in movimento. La parte protetta del verde può essere ottenuta prolungando e/o anticipando il verde rispetto a quello delle correnti antagoniste. L'utilizzo di un *verde prolungato*

è sempre ammissibile. Il *verde anticipato* deve essere invece valutato attentamente per quanto riguarda la sicurezza dei veicoli in svolta. In tal caso è preferibile adottare una fase apposita di svolta, a meno che i veicoli in svolta non arrivino tutti in corrispondenza del periodo di rosso per le correnti antagoniste (ad esempio per effetto di un particolare tipo di coordinamento). Nel caso in cui si utilizzi il verde anticipato, è consentito l'uso di una freccia verde di consenso, la cui durata non deve essere inferiore al tempo minimo di verde come definito nel seguito. Per tale freccia devono essere calcolati i tempi di sicurezza analogamente agli altri segnali veicolari. Nel tempo in cui la svolta non è protetta i veicoli in svolta possono essere avvertiti dell'esistenza di conflitti da una freccia gialla lampeggiante.

- Svolte a sinistra non protette

Le svolte a sinistra non protette sono da utilizzarsi soltanto nel caso di flussi antagonisti di modesta entità. Per lo smaltimento delle code di veicoli in svolta che si possono formare all'interno dell'intersezione è possibile prevedere un ritardato inizio della fase successiva. Nel caso di scarsa visibilità delle correnti antagoniste si ritiene opportuno consentire l'uso di un segnale giallo lampeggiante inserito per tutto il tempo in cui sono al verde le correnti antagoniste e per il relativo tempo di sgombero.

Svolte a destra

Le svolte a destra non presentano generalmente problemi particolari, in quanto in generale tali manovre non richiedono la presenza di un segnale direzionale apposito. Nel seguito sono, comunque, riportate le possibili situazioni ed alcuni suggerimenti in merito alla loro soluzione.

- Svolte a destra completamente protette

La presenza di un segnale direzionale apposito può essere prevista nel caso in cui i flussi delle correnti in conflitto siano particolarmente elevati, o nel caso in cui la svolta a destra possa essere effettuata a velocità tali da costituire pericolo per le correnti antagoniste. In presenza di corsie delimitate da isole spartitraffico triangolari, è da prevedere l'uso delle lanterne veicolari di corsia per le correnti in svolta a destra se la manovra viene effettuata su più corsie, se le correnti antagoniste sono particolarmente intense o infine se la velocità con cui viene effettuata la manovra può determinare situazioni di pericolo.

- Svolte a destra parzialmente protette

In presenza di corsie specializzate per la svolta a destra si presenta la possibilità di far defluire i veicoli in svolta anche in intervalli di tempo nei quali le correnti antagoniste vengono fermate. In tal caso risulta opportuno prevedere lanterne semaforiche veicolari di corsia, utilizzando la lanterna gialla lampeggiante di indicazione del passaggio pedonale per il tempo in cui quest'ultimo si trova al verde, considerando anche i relativi tempi di sgombero.

- Svolte a destra non protette

Nel caso di svolte a destra non protette, il conflitto con la corrente pedonale può essere segnalato con l'apposita lanterna gialla lampeggiante prevista dal codice. Sembra opportuno suggerire l'adozione di altre mascherine, oltre a quella pedonale, per avvisare i veicoli in svolta di possibili conflitti con mezzi pubblici (nel caso di corsie riservate sul lato destro), ovvero con biciclette. Il segnale di avviso deve lampeggiare anche durante i periodi di sgombero delle correnti in conflitto. Il conflitto con veicoli in svolta a sinistra provenienti dalla direzione opposta non è generalmente critica nei casi in cui non vi siano isole spartitraffico triangolari che delimitano la svolta a destra. In presenza di tali isole e con segnale verde pieno per la svolta a destra, il conflitto con le svolte a sinistra della direzione opposta deve essere evitato in quanto può generare situazioni di pericolo. Si può fare eccezione soltanto nel caso di una corsia sufficientemente lunga dopo il segnale semaforico, e dopo l'attraversamento pedonale in conflitto, in modo da poter installare un segnale di dare precedenza, eventualmente in presenza anche di un segnale giallo lampeggiante in modo da far riconoscere chiaramente ai veicoli in svolta l'esistenza di un conflitto con veicoli che possono sopraggiungere da sinistra.

- Svolte a destra non segnalate

Le svolte a destra non segnalate possono essere effettuate soltanto nel caso in cui vi sia una corsia apposita protetta da un'isola spartitraffico triangolare. L'utilizzo di questa soluzione deve essere valutato attentamente per quanto attiene la sicurezza, soprattutto nei casi in cui il flusso in svolta sia elevato o possa effettuare la manovra in velocità.

2.3.2. *Transizioni di fase*

Il passaggio da una fase ad un'altra avviene attraverso una transizione di fase. La transizione di fase è caratterizzata dal tempo fra l'istante in cui commuta al rosso il primo segnale della fase uscente, e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante. La transizione di fase contiene almeno i tempi di sgombero necessari per la sicurezza, ma può contenere anche tempi necessari per soddisfare particolari condizioni (ad esempio prolungare la durata di un segnale per sgomberare i veicoli che provengono da un altro segnale della stessa fase, nel caso di due segnali consecutivi a breve distanza). In generale è opportuno evitare di inserire attuazioni che modifichino la transizione di fase: qualora ciò sia previsto, l'attuazione deve essere effettuata in modo da garantire comunque il rispetto dei tempi di sicurezza.

2.4. Calcolo del piano semaforico

I parametri che definiscono un piano semaforico sono:

- la durata del ciclo (C);
- le durate del verde (v) dei segnali che controllano le diverse correnti e le rispettive posizioni nel ciclo;
- le durate dei gialli.

Le durate dei gialli sono state già trattate precedentemente. Nel presente capitolo si richiamano dapprima i concetti di base necessari per la regolazione di una corrente veicolare e successivamente sono indicati i vincoli da rispettare nella progettazione.

2.4.1. Piano semaforico di una singola intersezione

Indipendentemente dalla metodologia di progettazione adottata, la cui trattazione esula dagli scopi delle presenti norme, si richiamano in questo paragrafo le notazioni da utilizzare e si forniscono alcune indicazioni di carattere del tutto generale e consentono di definire i parametri di progetto.

Definizione di verde e rosso efficace

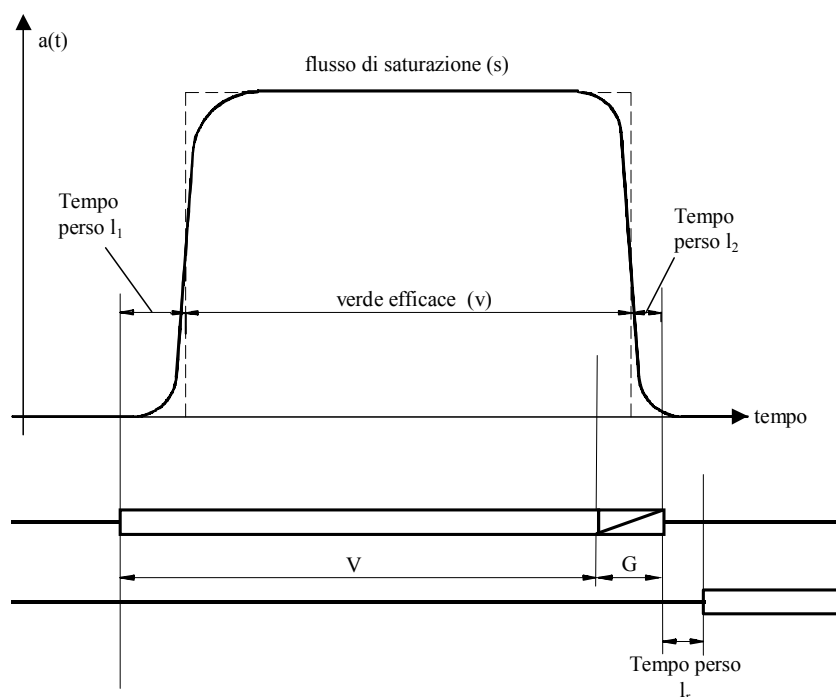
Nel calcolo di un piano semaforico ci si riferisce ad un tempo di verde equivalente, in termini di capacità, a quello reale (più il tempo di giallo), detto *verde efficace* (v), per il quale si assume che il valore del flusso di saturazione sia costante e pari ad s (Webster, 1958). In termini matematici il verde efficace può essere definito sulla base della funzione a(t), che esprime l'andamento nel tempo del flusso di veicoli in partenza, e del valore di s, misurabile nella fase di deflusso stabile della coda, con l'espressione:

$$v = (1/s) \int_0^{V+G} a(t) dt \text{ (secondi)}$$

mentre il rosso efficace risulta di conseguenza dalla:

$$r = C - v = V + G + R - v$$

Si noti che il verde di un segnale può essere attivato più di una volta in un ciclo semaforico: in tal caso il verde efficace è dato dalla somma dei singoli verdi efficaci.



Esempio di deflusso durante il verde:
verde reale, verde efficace e tempi persi.

Definizione di tempo perso

Come si è visto il tempo di verde reale e di giallo non possono essere utilizzati completamente per far defluire i veicoli ai valori del flusso di saturazione di ciascuna corrente. Pertanto per determinare il verde efficace, è necessario individuare il valore dei *tempi persi*, che svolgono un ruolo determinante nella progettazione del ciclo semaforico. Il tempo perso (I_1) all'avviamento è dovuto all'inerzia di avviamento dei veicoli all'inizio del verde, mentre quello di uscita (I_2) è dovuto all'arresto graduale che avviene sfruttando anche la durata del giallo. Il tempo di tutto rosso si ricava semplicemente sulla base della durata dell'intertempo di verde (t_t), che deve essere non inferiore al tempo di sicurezza, e di quella del tempo di giallo (G).

Per la somma dei tempi persi all'inizio ed alla fine del verde vale la relazione:

$$I = I_1 + I_2 = V + G - v$$

Il valore di I dipende principalmente dalle caratteristiche dei veicoli e dal comportamento degli utenti ed è solitamente compreso tra 2 e 3 secondi. In corrispondenza al periodo di tutto rosso il tempo perso si può esprimere nella forma, $I_r = t_t - G$, essendo t_t il tempo di transizione verso la fase successiva.

Relazioni generali

Per quanto riguarda le notazioni, il progetto deve riferirsi a:

- C durata del ciclo in secondi, assunta comune per tutte le correnti;
- v_i verde efficace per la corrente i (secondi);
- g_i giallo per la corrente i (secondi);
- l_i tempo perso per la corrente i (secondi);
- f_i flusso in arrivo per la corrente i (Ae/sec);
- s_i flusso di saturazione per la corrente i (Ae/sec).

Note le durate del tempo perso (l_i) e del giallo (g_i), è possibile determinare le durate del verde e del rosso semaforici, dalle durate del verde efficace (v_i) e del ciclo (c) con le relazioni seguenti:

$$V_i = v_i + l_i - g_i$$

$$R = C - (v_i + l_i)$$

La durata del ciclo e le durate dei verdi per le differenti correnti sono progettate in funzione dei flussi di arrivo e dei flussi di saturazione (nota l'organizzazione in correnti).

La successione dei segnali può essere descritta dagli istanti di inizio e fine dei periodi di verde e giallo che controllano ciascuna corrente. Generalmente tali istanti sono discretizzati al secondo (è comunque possibile ricorrere a discretizzazioni anche inferiori, ad esempio 0,5 secondi). Un ciclo semaforico di durata C secondi contiene dunque valori compresi fra 0 e C-1 (o fra 1 e C): gli istanti di inizio e fine dei periodi di verde e giallo di ciascuna corrente devono essere collocati all'interno di questo intervallo. Spesso si assume l'origine dell'intervallo coincidente con l'inizio del verde di un particolare segnale. Si assume, inoltre, che la regolazione si ripeta ciclicamente.

Il piano semaforico di una singola intersezione deve essere progettato in modo da consentire alle varie correnti di attraversarla con sicurezza.

2.4.2. Determinazione della durata del ciclo

La durata del ciclo è uno dei risultati delle attività di progetto del piano semaforico. In questa sede si riportano unicamente delle indicazioni relative ai campi di variazione di tale durata, che sono sintetizzati nella seguente tabella.

Durata	Secondi
Minima	30
Normale	50 – 75
Massima	90 – 120

La durata minima è generalmente condizionata dalle durate minime di ciascuna fase e dalla durata delle transizioni di fase, per cui generalmente è sconsigliabile scendere al di sotto dei 30 secondi. Per quanto riguarda invece la

durata massima si suggerisce di non oltrepassare la soglia dei 120 secondi se non in casi eccezionali. Qualora dalla progettazione risultassero necessari cicli di durata superiore, le ipotesi di progetto dovrebbero essere attentamente riconsiderate.

2.4.3. Determinazione dei tempi di verde

Nella determinazione dei tempi di verde devono essere rispettati i seguenti vincoli.

Durata minima del verde.

La durata minima del verde per correnti veicolari non dovrebbe di norma essere inferiore ai 10 secondi. Per le correnti principali si raccomanda di utilizzare tempi non inferiori ai 15 secondi. Nel caso di flussi veicolari particolarmente bassi ovvero nel caso di impianti attuati dal traffico, la durata minima può essere ridotta fino ad un minimo di 5 secondi. Per i mezzi pubblici, biciclette e pedoni la durata di verde minima non dovrebbe essere inferiore ai 5 secondi. La durata minima del verde per le svolte a sinistra non dovrebbe di norma essere inferiore ai 10 secondi. Nel caso di utilizzo di frecce direzionali per indicare la parte di svolta a sinistra protetta, tale freccia non dovrebbe durare meno di 5 secondi.

Anticipo del verde in casi di conflitto

L'inizio del verde per movimenti di pedoni o biciclette dovrebbe avvenire 1 o 2 secondi prima dell'arrivo di veicoli provenienti da manovre in conflitto. Il calcolo va effettuato sulla base dei tempi necessari ad impegnare l'area di conflitto.

Ritardo dell'inizio del verde

I veicoli in svolta a sinistra non protetta che hanno superato la linea di arresto e non possono eseguire la manovra per la presenza del traffico opposto devono poter liberare l'area d'incrocio senza rischi. Qualora per i veicoli della fase successiva vi siano delle difficoltà nel riconoscere la presenza dei veicoli in svolta, tale fase va ritardata di un intervallo di tempo di 2÷4 secondi in modo da garantire lo svuotamento della manovra di svolta.

Rientro nella stessa fase

Nel caso di impianti attuati dal traffico, qualora la logica d'attuazione determini l'inserzione di una fase appena terminata, la sequenza della transizione, se già iniziata, in atto deve essere completata prima di riposizionarsi sulla fase stessa.

2.4.4. Determinazione dei tempi di rosso

Nella determinazione dei tempi di rosso devono essere considerati i seguenti vincoli.

Durata massima del rosso

La durata massima del rosso dipende da molteplici fattori, quali:

- accettazione da parte di pedoni e di ciclisti;
- disponibilità di spazi di accumulo per i veicoli in coda;
- disponibilità di spazi per l'accumulo di pedoni e ciclisti;
- ritardi per i mezzi pubblici.

Per pedoni e ciclisti non si dovrebbe superare una durata massima di 60 secondi mentre si può accettare una durata anche doppia per il traffico veicolare.

Durata minima del rosso

Nel caso di impianti attuati dal traffico, nel caso di rientro nella fase uscente deve essere garantita una durata minima di 1 secondo di tutto rosso.

2.4.5. Piano semaforico di una rete di intersezioni

Un piano semaforico di una rete di intersezioni è costituito dall'insieme delle informazioni necessarie a descrivere compiutamente sia la durata del ciclo semaforico sia gli istanti di accensione e di spegnimento dei singoli segnali, delle differenti intersezioni. In particolare, per una rete di n intersezioni con una comune durata del ciclo C (ovvero un sottomultiplo di C), fissata l'origine dell'asse temporale globale, si deve definire la posizione dell'origine dell'asse temporale locale del piano semaforico di ciascuna intersezione, rispetto all'origine globale, o *piano di coordinamento*. Assegnata la durata di un ciclo comune, i piani semaforici delle singole intersezioni e il piano di coordinamento definiscono il *piano semaforico della rete* (un esempio di piano di coordinamento è riportato Nell'Appendice C).

2.5. Valutazione

L'ultima fase del processo di progettazione consiste nella valutazione del funzionamento della regolazione semaforica progettata, sia a livello di singola intersezione, sia a livello di rete. Tale valutazione costituisce un elemento di fondamentale importanza in quanto consente di evitare l'introduzione di sistemi di regolazione inefficienti o addirittura dannosi per l'intera circolazione veicolare. Nel presente capitolo si analizzano gli elementi da considerare nella valutazione, con particolare riferimento agli indici di saturazione ed ai livelli di servizio.

2.5.1. Analisi delle condizioni di saturazione di una intersezione

L'analisi delle condizioni di saturazione di un'intersezione può essere condotta con vari indicatori equivalenti, noto il valore del flusso in arrivo per le varie correnti ed indipendentemente dal suo andamento nel tempo. Siano, con riferimento alla simbologia introdotta nel paragrafo 4.2:

$\gamma_i = v_i / C$ la frazione del ciclo utilizzata dal verde efficace della corrente i ;
 $y_i = f_i / s_i$ il rapporto tra flusso in arrivo e flusso di saturazione per la corrente i ;

- $s_i \gamma_i$ la capacità unitaria (veic/sec) per la corrente i (prodotto tra il flusso di saturazione e la frazione del ciclo utilizzata dalla corrente);
- $x_i = (f_i \cdot C) / (s_i \cdot v_i) = y_i / \gamma_i$ il coefficiente di saturazione per la corrente i , rapporto tra flusso in arrivo e capacità della corrente;
- $\mu_i = (s_i \cdot v_i) / (f_i \cdot C) = 1/x_i$ il coefficiente di capacità della corrente i , inverso del coefficiente di saturazione;
- $\mu_i - 1$ la riserva di capacità della corrente i .

La corrente i si dice in condizioni di *sottosaturazione* (*sovrasaturazione*) se il numero di utenti in arrivo in un ciclo è minore (maggiore) del numero di veicoli che possono partire durante il verde efficace:

$$f_i C < s_i v_i \quad f_i < s_i \gamma_i \quad y_i < \gamma_i$$

condizioni che possono essere anche espresse come:

$$x_i < 1 \quad \mu_i > 1 \quad \mu_i - 1 > 0$$

Gli indicatori definiti per le singole correnti possono essere facilmente estesi all'intera intersezione. Si definiscono infatti:

- $x = \text{MAX}_i x_i$ coefficiente di saturazione dell'intersezione;
- $\mu = \text{MIN}_i \mu_i$ coefficiente di capacità dell'intersezione;
- $\mu - 1$ riserva di capacità dell'intersezione.

La condizione di sottosaturazione per l'intersezione è data quindi da una delle seguenti relazioni equivalenti:

$$x < 1 \quad \mu > 1 \quad \mu - 1 > 0$$

2.5.2. Analisi del ritardo per una intersezione semaforizzata

Il ritardo subito da un generico veicolo è definito dalla differenza tra il tempo impiegato per attraversare l'intersezione e il tempo che lo stesso veicolo avrebbe impiegato in presenza di via libera continua. Una stima può essere ottenuta utilizzando alcune espressioni analitiche che esprimono il ritardo in funzione dei parametri di regolazione e del flusso in arrivo.

In particolare il ritardo ad un accesso di una intersezione può essere ottenuto come somma di due termini:

- il *ritardo deterministico*, che esprime la componente di ritardo dovuta ad arrivi assunti periodicamente costanti e dipende dall'andamento degli arrivi;
- il *ritardo stocastico*, che esprime il ritardo dovuto alle fluttuazioni stocastiche degli arrivi rispetto al valore medio ed eventualmente il ritardo dovuto a condizioni di sovrasaturazione.

Nel caso di accesso isolato, in cui si assume che gli arrivi non siano influenzati dalle intersezioni a monte, è possibile adottare, tra le numerose espressioni proposte, le note formule in due o tre termini proposte da Webster, inizialmente sviluppate nel caso di condizioni di sottosaturazione ed estese successivamente al caso di sovrasaturazione.

Nel caso di intersezioni non isolate l'analisi del ritardo deve essere condotta considerando le mutue interazioni tra le diverse intersezioni (mentre l'analisi della capacità non richiede invece di considerare queste interazioni). In questo caso il ritardo deterministico è influenzato dalla legge degli arrivi, mentre il ritardo stocastico non dipende da tale legge e è calcolato come nel caso di accesso isolato. Si noti che, il ritardo degli utenti dovuto a fenomeni di sovrasaturazione causati da fluttuazioni stocastiche dei flussi rispetto all'andamento degli arrivi, è incluso nel ritardo stocastico. In particolare l'andamento degli arrivi nel tempo, o forma del plotone in arrivo, ad un accesso non isolato è, in generale, non uniforme e dipende da tre differenti fenomeni che avvengono tra le due intersezioni adiacenti.

- La *distorsione* di un plotone che si immette su un ramo stradale è la variazione di forma dovuta alla presenza della regolazione semaforica nell'intersezione a monte del ramo stesso. Infatti, il flusso in uscita ad ogni istante (altezza del plotone) non può superare il flusso di saturazione s ed il tempo utilizzato dai veicoli per attraversare la linea di arresto (durata del plotone) non può superare la durata del verde efficace. La forma del plotone che si immette nel ramo stradale è definita sommando i plotoni che utilizzano i diversi accessi dell'intersezione a monte.
- La *dispersione* del plotone è la variazione di forma che esso subisce lungo un ramo stradale, a causa delle differenze nel comportamento dei guidatori e nell'efficienza dei veicoli.
- La *divisione* di un plotone è la variazione di forma che avviene quando il plotone giunge alla linea di stop dell'intersezione a valle, e si suddivide nelle manovre che la costituiscono.

Questi tre differenti fenomeni possono essere rappresentati con l'uso di profili ciclici di flusso, profili che rappresentano l'andamento nel tempo del flusso per ciascuna sezione di un ramo stradale.

2.5.3. Valutazione ex-ante

Intersezioni isolate. Nel caso di intersezioni isolate la valutazione del livello di saturazione può essere fatta, sulla base dei valori massimi di flusso misurati nell'arco della giornata e dei tempi di verde del piano semaforico. Per impianti di tipo attuato dal traffico il piano da considerare è quello corrispondente ad attuazioni sempre presenti e quindi con i tempi di verde alla loro massima estensione. Sempre in questa situazione sono da valutare i ritardi per i veicoli in modo da individuare il livello di servizio dell'intersezione; tale valutazione può

essere effettuata utilizzando uno dei molteplici modelli proposti per la valutazione dei ritardi. Ad esempio si può fare riferimento alla metodologia proposta dal Highway Capacity Manual americano. La valutazione dovrebbe essere effettuata in rapporto allo stato esistente, in modo da evidenziare i benefici attesi dall'introduzione o dalla modifica di un impianto semaforico.

Reti di intersezioni coordinate. La valutazione del funzionamento di una rete semaforizzata, in termini di tempi persi per veicolo e di stima dei consumi, costituisce un problema più delicato e richiede in genere l'uso di modelli di tipo simulativo. Uno dei modelli maggiormente utilizzati in questo contesto è il TRANSYT, che può essere utilizzato sia per la valutazione di una situazione esistente (semaforizzata), sia per la determinazione del piano di coordinamento della rete. E' opportuno sottolineare che l'utilizzo di questi modelli richiede una particolare conoscenza delle loro prestazioni e dei loro limiti di impiego.

2.5.4. Valutazione ex-post

Il traffico presenta un'evoluzione dinamica, pertanto le situazioni di progetto possono non corrispondere a quelle riscontrabili sia immediatamente dopo l'introduzione di un nuovo sistema di regolazione sia successivamente.

L'introduzione di un nuovo schema di regolazione può portare a benefici che inducono modifiche nella distribuzione dei flussi veicolari all'interno della rete; si può, quindi, determinare un incremento dei flussi rispetto a quelli misurati in sede di progetto. Si rendono, in generale, necessari una verifica ed un aggiustamento dei piani semaforici e dei piani di coordinamento nel breve termine.

Per quanto riguarda orizzonti temporali più lunghi, è necessario effettuare una revisione periodica del funzionamento degli impianti per accertare se le modifiche intervenute nei flussi di traffico non diano luogo ad un eccessivo aumento dei ritardi. La revisione deve essere più frequente (annuale) nel caso di regolazioni a piano semaforico fisso mentre può essere effettuata ad intervalli più lunghi nel caso di impianti di tipo attuato.

3. ELABORATI DEL PROGETTO

Il progetto deve contenere come minimo la seguente documentazione.

1. Tavola di inquadramento dell'intersezione o delle intersezioni nella rete. Da tale tavola devono essere desumibili le caratteristiche geometriche relative alle distanze fra intersezioni. In particolare, nel caso di reti semaforizzate, la tavola di riferimento dovrebbe essere in scala non superiore a 1:2000.
2. Planimetria di ciascuna intersezione facente parte del progetto in scala (1:200) ÷ (1:500) riportante lo stato di fatto;
3. Planimetria di ciascuna intersezione, anche schematizzata, riportante i dati relativi ai volumi di traffico per le situazioni per le quali si progettano i piani semaforici (possibilmente nella stessa scala di cui al punto 2);
4. Planimetria di ciascuna intersezione, nella stessa scala di cui al punto 2, riportante la situazione di progetto relativa alla geometria dell'intersezione (se variata), con l'indicazione degli attestamenti, delle corsie, della segnaletica orizzontale e verticale, della posizione dei segnali e della relativa numerazione. Ciascuna lanterna va indicata con il numero di segnale di riferimento, seguito dal numero d'ordine della lanterna (ad esempio: segnale 5, lanterne 5.1, 5.2,...). I segnali che controllano correnti diverse vanno indicati con numeri diversi. Le correnti di traffico vanno indicate con lo stesso numero utilizzato per il segnale che le controlla.
5. Planimetria di ciascuna intersezione, nella stessa scala di cui al punto 2, riportante la posizione dei pali di sostegno delle lanterne, i tracciati degli scavi dei cavidotti, la posizione dei pozzetti e la posizione degli altri manufatti accessori (spire di rilevamento del traffico, colonnine luminose, ecc.). In corrispondenza al tracciato dei cavidotti deve essere riportato il numero ed il diametro delle tubazioni utilizzate, nonché il numero e la composizione dei cavi da collocare nelle tubazioni stesse.
6. Nel caso di controllo attuato dal traffico le fasature previste, le transizioni ammesse tra le fasi, il diagramma di temporizzazione relativo al caso di richieste sempre presenti per tutte le correnti, la logica di controllo con l'indicazione delle condizioni di permanenza nella singola fase e di transizione fra fasi, ivi compresi i tempi necessari alla regolazione (tempi minimi, massimi, parametri di prolungamento o di accorciamento del verde, ecc.) ;

7. Caratteristiche dei regolatori da installare;
8. Indicazione dei collegamenti dei segnali alle uscite di potenza dei regolatori semaforici;
9. Matrici dei tempi di sicurezza per ciascuna intersezione con relative indicazioni sui parametri adottati nella loro definizione;
10. Tempi di giallo per ciascun segnale, con relative motivazioni della loro scelta, se difforni da quelli consigliati;
11. Piani semaforici per ciascuna intersezione e per tutte le situazioni di traffico considerate, rappresentati dai diagrammi di temporizzazione;
12. Piani di coordinamento, nel caso di rete semaforizzata, per tutte le situazioni di traffico considerate;
13. Valutazione del funzionamento di ciascuna intersezione (stima del livello di saturazione e stima del livello di servizio);
14. Valutazione del funzionamento della rete (tempo perso per veicolo, stima dei consumi) con riferimento alla situazione esistente e ad eventuali altri soluzioni;
15. Relazione tecnica. Lavori da eseguire e relative modalità di esecuzione;
16. Lista dei lavori e delle forniture;
17. Computo metrico estimativo.

Appendice A1

Glossario dei principali termini in uso nella tecnica del traffico stradale

Il glossario di seguito proposto è sostanzialmente quello dettato dalla CIRCOLARE MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI, N. 30 (Direzione Generale Circolazione e Traffico) del 3 gennaio 1963. Esso è stato rivisitato in alcune voci per tener conto di modifiche successive al Codice della Strada, ed integrato con una sezione D (Monitoraggio del traffico).

Si ritiene opportuno richiamare le premesse della circolare sopra citata, che rimarca il significato stesso del glossario:

“L’unificazione della terminologia costituisce, in ogni campo della tecnica, l’indispensabile premessa per un inquadramento razionale della materia trattata; e questa esigenza si impone maggiormente nei casi (come quello del traffico stradale, divenuto ormai di interesse generale), per i quali occorre impostare su basi rigorosamente tecniche gli opportuni provvedimenti.

D’altra parte, il continuo incremento della circolazione motorizzata ha reso sempre più necessario e frequente lo scambio di notizie e informazioni tecniche fra tutti gli uffici ed enti pubblici e privati interessati all’argomento.

Si è pertanto riconosciuta la necessità di classificare e definire i concetti fondamentali relativi al traffico stradale, attribuendo un preciso ed univoco significato ai termini tecnici più comunemente adottati in questo settore.

I competenti organi ministeriali, con la collaborazione della commissione permanente per l’automobilismo, nella quale sono rappresentati amministrazioni, università, enti e categorie interessati ai problemi della motorizzazione, hanno quindi elaborato un complesso di definizioni, allo scopo di procedere alla unificazione della terminologia relativa al traffico stradale, onde consentire una maggiore chiarezza ed un maggiore rigore tecnico nella compilazione sia dei provvedimenti, sia degli studi inerenti la circolazione dei veicoli.

In relazione a quanto sopra, si rivolge viva preghiera alle amministrazioni ed agli enti cui la presente è diretta affinché, ciascuno nell’ambito della propria competenza, svolgano opera di diffusione e di raccomandazione per la adozione della terminologia di cui trattasi.

In particolare, i provveditorati regionali alle opere pubbliche, gli ispettorati compartimentali della motorizzazione civile e dei trasporti in concessione e gli uffici provinciali del genio civile sono pregati di volersi attenere, nella propria corrispondenza di ufficio e nei rapporti con enti, comitati, commissioni, ecc., in materia di traffico stradale, alla terminologia che si trasmette in allegato”.

A-3 ACCESSI, RACCORDI, INTERSEZIONI, ISOLE ED INTERSCAMBI

1. Accesso regolato - Accesso stradale presidiato o provvisto di apprestamenti per la regolazione della circolazione.
2. Accesso stradale - Zona di ingresso ad una carreggiata stradale.
3. Braccio (o ramo) di intersezione - Tratto di strada afferente una intersezione.
4. Crocevia - Intersezione a quattro bracci formata da due strade intersecantesi ad angolo approssimativamente retto.
5. Interscambio - Complesso di rampe ed opere stradali a livelli separati atto a consentire lo scambio delle correnti eliminando i punti di conflitto.
6. Intersezione - Luogo dove due o più strade si intersecano sotto qualunque angolo.
7. Intersezione a "T" - Intersezione a tre bracci in cui uno dei bracci e il prolungamento di un altro ed il terzo forma con i primi approssimativamente un angolo retto.
8. Intersezione a "Y" - Intersezione a tre bracci diversa da quella a "T".
9. Intersezione ad "X" - Intersezione a quattro bracci formata da due strade che si intersecano obliquamente, con angolo sensibilmente diverso da quello retto.
10. Intersezione a livelli sfalsati - insieme di infrastrutture (sovrappassi, sottopassi e rampe) che consente lo smistamento delle correnti veicolari fra rami di strade poste a livelli diversi.
11. Intersezione a raso (o a livello) - Area comune a più strade, organizzata in modo da consentire lo smistamento delle correnti di traffico dall'una all'altra di esse.
12. Intersezione multipla - Intersezione a 5 o più bracci.
13. Intersezione sfalsata - Due intersezioni stradali a "T" vicine e con bracci da bande opposte.
14. Isola di canalizzazione - Parte della strada, opportunamente delimitata e non transitabile, destinata a incanalare le correnti di traffico.
15. Isola di rotazione - Isola centrale di una circolazione rotatoria.
16. Passo carrabile - Accesso ad un'area laterale idonea allo stazionamento di uno o più veicoli.
17. Quadrifoglio - Interscambio comprendente un sovrappasso, quattro rampe dirette per la svolta a destra e quattro rampe indirette per la svolta a sinistra.
18. Quadrivio - Vedi Crocevia.
19. Raccordo - Tratto di strada di collegamento tra una carreggiata ed un'altra
20. Raccordo concavo - Raccordo tra due livellette contigue di diversa pendenza che si intersecano al di sotto della superficie laterale. Tratto di strada con andamento longitudinale concavo.
21. Raccordo convesso - Raccordo tra due livellette contigue di diversa pendenza che si intersecano al di sopra della superficie laterale. Tratto di strada con andamento longitudinale convesso.
22. Rampa - Strada di raccordo, atta a collegare due carreggiate site a livelli diversi.
23. Rampa diretta - Rampa che curva direttamente verso la direzione finale di innesto.
24. Rampa indiretta - Rampa che curva in senso inverso alla direzione finale e sulla quale il traffico si svolge in senso orario.
25. Rampa semidiretta - Rampa che, prima di curvare come le rampe dirette, inizia con una più o meno sensibile controcurva o flessione contraria.

26. Rotatoria - Intersezione regolata a circolazione rotatoria nella quale il traffico viene incanalato su una sola carreggiata a senso unico antiorario.
27. Rotatoria a livelli diversi - Interscambio a due livelli tra due strade, comprendente due sovrappassi, svolte a destra dirette e svolte a sinistra semidirette mediante scambio di traiettorie lungo la rotatoria.
28. Salvagente - Parte della strada, rialzata o opportunamente delimitata e protetta, destinata al riparo o alla sosta dei pedoni, in corrispondenza di attraversamenti pedonali o di fermate dei trasporti collettivi.
29. Tromba - Interscambio a "T" a due livelli comprendente un sovrappasso, due rampe dirette per la svolta a destra, una rampa semidiretta ed una indiretta per svolte a sinistra.
30. Zona di approccio - parte di un braccio di intersezione interessato
31. Zona di attestamento - Tratto di carreggiata, immediatamente a monte della linea di arresto, destinato all'accumulo dei veicoli in attesa di via libera e, generalmente, suddiviso in corsie specializzate separate da strisce longitudinali continue.
32. Zona di intersezione - Parte dell'intersezione a raso, nella quale si intersecano due o più correnti di traffico.
33. Zona di preselezione - Tratto di carreggiata, opportunamente segnalato, ove è consentito il cambio corsia affinché i veicoli possano incanalarsi nelle corsie specializzate.
34. Zona di scambio - Tratto di carreggiata a senso unico, di idonea lunghezza, lungo il quale correnti di traffico parallele, in movimento nello stesso verso, possano cambiare la reciproca posizione senza doversi arrestare.

C-2 SEGNALAZIONI SEMAFORICHE (APPARECCHI E DISPOSITIVI VARI)

1. Ciclo semaforico - Successione completa di fasi che si ripete periodicamente.
2. Faccia del semaforo - Parte di un semaforo che fornisce segnalazioni al traffico proveniente da una sola direzione.
3. Fase semaforica - Frazione del ciclo semaforico che regola uno o più movimenti del traffico.
4. Intervallo semaforico - Tempo durante il quale l'indicazione presentata da una faccia del semaforo rimane invariata.
5. Lunghezza del ciclo semaforico - Tempo necessario per lo Svolgimento di un ciclo semaforico.
6. Regolazione a tempo fisso - Funzionamento di un semaforo secondo un ciclo predeterminato.
7. Regolazione progressiva - Funzionamento dei semafori lungo un determinato itinerario nel quale la segnalazione
8. Regolazione progressiva a sistema alternato - Regolazione progressiva per itinerari a doppio senso di marcia nella quale i semafori cambiano segnalazione nel medesimo tempo e quelli adiacenti mostrano indicazioni alternativamente opposte.
9. Regolazione progressiva a sistema simultaneo - Regolazione progressiva per itinerari a doppio senso di marcia nella quale i semafori cambiano segnalazione nel medesimo tempo.
10. Regolazione progressiva flessibile - Regolazione progressiva in cui la durata dei cicli può variare in accordo coi vari volumi di traffico.
11. Rilevatore di traffico - Dispositivo automatico che rileva i passaggi dei veicoli.

12. Semaforo - Dispositivo che regola le correnti di traffico mediante segnali luminosi.
13. Semaforo a comando elettromeccanico - Semaforo con regolazione delle fasi comandate da un meccanismo elettrico ad orologeria.
14. Semaforo a comando indipendente - Semaforo il cui funzionamento non è coordinato con quello di altri impianti.
15. Semaforo a comando manuale - Semaforo con regolazione delle fasi comandate a mano.
16. Semaforo a comando sincronizzato - Semaforo il cui funzionamento è coordinato con altri impianti semaforici.
17. Semaforo comandato dal traffico - Semaforo con regolazione delle fasi comandabili dai rilevatori (traffico veicolare) o dai pulsanti (traffico pedonale).
18. Semaforo pedonale - Semaforo esclusivamente impiegato per la regolazione dei movimenti pedonali.

D - MONITORAGGIO DEL TRAFFICO

1. Monitoraggio del traffico - Controllo dell'andamento dei fenomeni di traffico mediante strumenti di misura.
2. Sensore - Dispositivo che produce un segnale descrittivo di caratteristiche del traffico rilevato.
3. Rilevatore - Dispositivo elettronico capace di codificare il segnale prodotto dal sensore.
4. Sistema di trasmissione dati - Sistema atto al trasferimento delle informazioni codificate, dal sensore al rilevatore, dal rilevatore ad un'unità locale, dall'unità locale ad un'unità centrale.
5. Trattamento – Elaborazione destinata a fornire dei risultati a partire dai dati provenienti dai rilevatori; esso può essere centralizzato o avvenire, almeno in parte, presso le unità locali (stazioni di misura).

Appendice A2

Glossario

Dei principali termini utilizzati

In questo paragrafo si introducono alcune definizioni di base relative a concetti comunemente impiegati nell'analisi delle intersezioni semaforizzate.

Definizioni relative alla geometria delle intersezioni

Attestamento

Con riferimento ai veicoli in arrivo su un tratto di strada che confluisce in un'area di intersezione, si definisce *attestamento* l'insieme di corsie che permettono a detti veicoli di uscire dal tratto di strada effettuando tutte le manovre consentite. La parte terminale degli attestamenti è costituita dalla *linea di arresto*.

Accesso

In un'intersezione semaforizzata gli attestamenti possono essere suddivisi in esterni ed interni: quelli esterni, costituiti dai tratti di strada che provengono da altre intersezioni, sono detti anche *accessi*.

Manovre

Le *manovre* corrispondono alle possibili direzioni che l'utente può seguire nell'attraversamento dell'intersezione nel rispetto della disciplina di circolazione.

Corsia

Una corsia è una parte longitudinale della strada di larghezza idonea a permettere il transito di una sola fila di veicoli.

Gruppo di corsie

Il gruppo di corsie è un insieme costituito da una o più corsie adiacenti. Un attestamento può essere suddiviso in uno o più *gruppi di corsie*, ciascuno dei quali consente di effettuare un sottoinsieme delle manovre ammissibili. Un gruppo di corsie è controllato da un unico segnale semaforico.

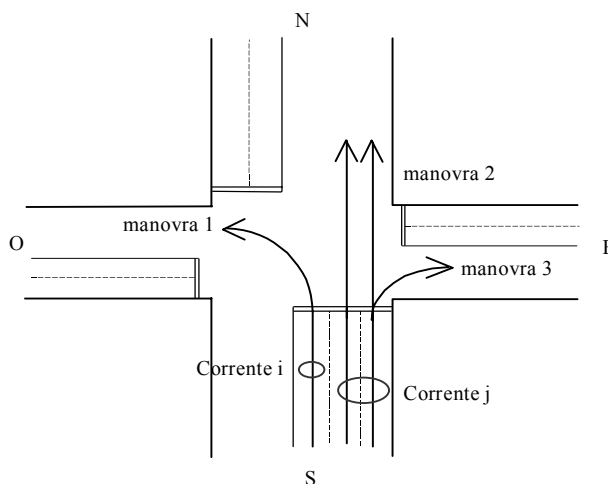
Definizioni relative al movimento degli utenti

Corrente

Per ogni gruppo di corsie, l'insieme di tutti i veicoli che effettuano le relative manovre è detto *corrente*. Per quanto detto sopra ogni corrente è controllata da un unico segnale semaforico. Il termine corrente si riferisce anche ad altri utenti che attraversano l'intersezione, quali pedoni, cicli, ecc.

Con riferimento alla figura seguente, l'attestamento del tratto di strada entrante dal basso (S) è costituito da tre corsie. Le manovre in uscita dall'attestamento sono quelle di svolta a destra, a sinistra e di attraversamento diretto. Supponendo che la manovra di svolta a sinistra (1) sia regolata separatamente da quelle dritto (2) e svolta a destra(3), si possono definire due gruppi di corsie: il primo costituito dalla corsia di sinistra, percorsa dalla corrente

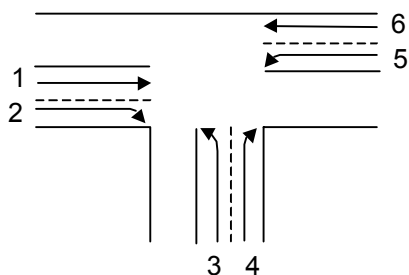
i dei veicoli che effettuano la manovra di svolta a sinistra ed il secondo costituito dalle altre due corsie, percorse dalla corrente j dei veicoli che procedono dritti e/o svoltano a destra.



Esempio di attestamenti, correnti e manovre

Correnti compatibili

Due correnti si dicono *compatibili* quando possono attraversare contemporaneamente l'intersezione in condizioni di sicurezza. Ad esempio per l'intersezione a tre braccia in figura sono compatibili le coppie di correnti (1,2), (1,6), (2,3), (2,4), (2,6), (3,4), (4,5), (4,6).



Intersezione a T con indicazione di correnti e segnali

Correnti incompatibili

Due correnti si dicono *incompatibili* (per confluenza o attraversamento) quando non possono attraversare contemporaneamente l'intersezione con sicurezza, poiché le manovre corrispondenti confluiscono in una stessa corsia, o si attraversano e quindi presentano uno o più punti di conflitto. Ad esempio, per l'intersezione riportata nella figura 2.2 sono incompatibili le coppie di correnti (1,3), (1,4), (1,5), (3,5), (3,6), (5,2).

Flusso (f)

Il *flusso (f)* di una corrente è il numero di veicoli, appartenenti alla corrente stessa, che transitano attraverso una sezione nell'unità di tempo ed è espresso in veicoli/secondo o veicoli/ora.

Flusso di saturazione (s)

Il *flusso di saturazione (s)* di una corrente è il flusso massimo, espresso in veicoli/secondo o veicoli/ora, che può attraversare a regime la linea d'arresto del gruppo di corsie appartenenti alla corrente, in presenza di coda continua.

Il flusso di saturazione dipende principalmente dalle caratteristiche geometriche dell'intersezione, dalla composizione del flusso e dalle modalità di regolazione (vedi l'appendice A.1). Osservando l'andamento nel tempo del flusso di veicoli durante il verde si nota che il distanziamento temporale tra veicoli successivi non è costante: in particolare, è maggiore per i primi veicoli, mentre tende a raggiungere un valore minimo (di solito dell'ordine di 2 sec. per corsia) per i restanti. L'inverso del tempo di distanziamento minimo corrisponde al flusso di saturazione ($s=0,5$ veicoli/sec. per corsia con distanziamenti di 2 sec.). Il flusso in uscita tende quindi a zero durante il periodo di giallo.

Definizioni relative alla regolazione semaforica

Lanterne semaforiche

Le lanterne semaforiche sono segnali luminosi conformi a quanto prescritto dall'art. 41 del Nuovo Codice della Strada e dagli artt. 158,159,160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167 del relativo Regolamento.

La regolazione semaforica si basa, nel caso di segnali veicolari normali, sulla successione ordinata di accensione delle luci: *verde (V)*, con significato di via libera, *giallo (G)*, con significato di preavviso di arresto e *rosso (R)*, con significato di arresto. L'art. 41 del NCdS disciplina il comportamento che gli utenti devono osservare in presenza di dette luci.

Segnale semaforico

Si dice *segnale semaforico* l'insieme di lanterne semaforiche, costituito da una o più lanterne collegate fisicamente in parallelo, che controlla un'unica corrente (ad esempio un attraversamento pedonale o una corrente veicolare).

Le correnti ed i segnali costituiscono le entità di base per la progettazione del controllo del traffico e per la valutazione degli effetti di tale controllo.

Gruppo di segnali

Per gruppo di segnali si intende un insieme costituito da uno o più segnali semaforici collegati fisicamente in parallelo.

Ciclo semaforico

Si definisce *ciclo semaforico* una qualunque sequenza di indicazioni semaforiche, alla fine della quale si ripresenta la medesima configurazione di

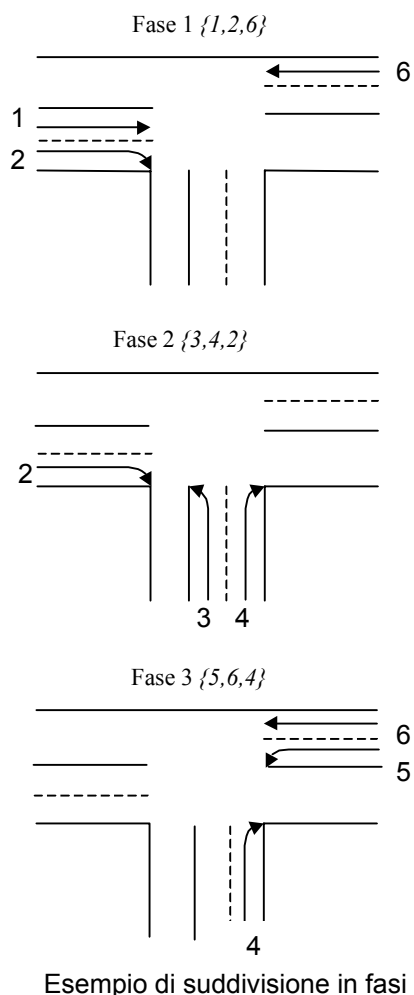
luci esistente all'inizio della sequenza stessa. Una sequenza si dice completa se garantisce la via libera almeno una volta a tutte le correnti che impegnano l'intersezione. In genere per ciclo semaforico si intende una sequenza completa.

Durata del ciclo semaforico (C)

La *durata del ciclo semaforico* (c), espressa in secondi, è l'intervallo di tempo necessario per completare un ciclo semaforico.

Fase

Si dice *fase* la parte di un ciclo in cui viene assegnato simultaneamente il verde, in uno o più intervalli del ciclo, ai segnali di un insieme di correnti mutuamente compatibili. Una fase è completa se non è possibile aggiungervi ulteriori correnti compatibili con quelle già incluse. In figura è riportato un esempio di suddivisione in fasi per una intersezione a T.



Durata della fase

La *durata di una fase*, espressa in secondi, è l'intervallo di tempo in cui è assegnato il verde a *tutti* i segnali della fase.

Transizione di fase

Il passaggio da una fase ad un'altra avviene attraverso una *transizione di fase*, caratterizzata dal tempo fra l'istante in cui commuta al rosso il primo segnale della fase uscente e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante.

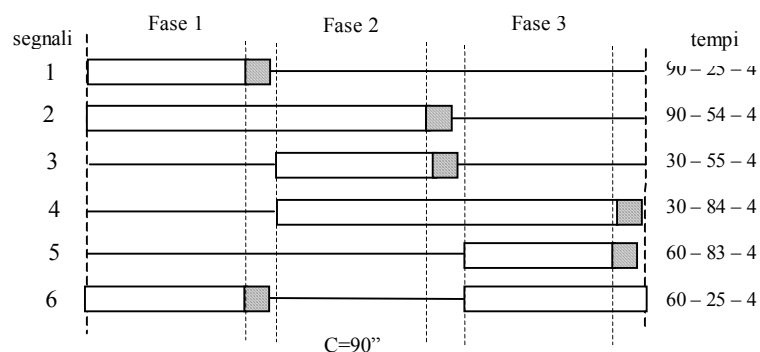
Struttura del piano semaforico

La *struttura di un piano semaforico* è definita da una successione ordinata di fasi e delle relative transizioni di fase. Per realizzare un ciclo completo è necessario che ogni corrente abbia il verde in almeno una fase della struttura.

Piano semaforico

Un piano semaforico di una singola intersezione è costituito dall'insieme delle informazioni necessarie a descrivere compiutamente sia la durata del ciclo semaforico sia gli istanti di accensione e di spegnimento dei singoli segnali.

In figura è riportato un esempio di piano semaforico per una intersezione a T.



Esempio di piano semaforico

Le modalità con cui possono essere definite le suddette informazioni sono molteplici. A titolo di esempio si possono fornire la durata del ciclo e, per ogni segnale, i tempi di inizio e di fine del verde e la durata del giallo, come indicato in figura 2.4. In alternativa lo stesso piano può essere anche definito come una successione di 3 fasi, le relative transizioni di fase, e le durate di ciascuna fase e dei passi costituenti le transizioni di fase; in questo caso la durata del ciclo risulta dalla somma dei singoli tempi.

Intersezioni isolate o non isolate

La regolazione semaforica induce un effetto di concentrazione dei flussi di utenti in uscita dall'intersezione (formazione di plotoni di veicoli). Questo effetto rilevante si riduce lungo i rami stradali a valle dell'intersezione principalmente a causa delle differenze di velocità tra i veicoli, fino ad essere trascurabile ad una certa distanza dall'intersezione stessa. Questa distanza, variabile con le

caratteristiche geometriche della rete stradale, l'entità dei flussi, la composizione del parco veicolare, le attitudini di guida etc., è in generale dell'ordine di alcune centinaia di metri (500-700 m).

Sulla base di queste considerazioni, un accesso di una intersezione si dice *isolato* se il fenomeno di concentrazione dovuto alle intersezioni a monte è trascurabile, altrimenti si dice *non isolato*. Una intersezione con tutti gli accessi isolati si dice *isolata*, altrimenti *non isolata*.

Appendice B

Determinazione del flusso di saturazione

Si ricorda che il *flusso di saturazione* è il flusso massimo che può attraversare a regime la linea d'arresto, in presenza di coda continua. Poiché in generale il deflusso avviene in condizioni forzate, i fattori che implicano riduzioni di velocità comportano pure riduzioni di portata. Tali fattori sono:

- composizione del flusso veicolare;
- pendenza della strada;
- localizzazione dell'incrocio nell'area urbana;
- manovre di svolta (a destra e sinistra) ed interferenze con veicoli e pedoni.

Il metodo proposto per la determinazione del flusso di saturazione di un accesso (sulla scorta di numerose esperienze riportate in letteratura) consiste nel valutare un flusso di saturazione base s_b e correggere successivamente tale flusso con coefficienti K_i che tengono conto delle differenze tra la situazione base e quella reale. Risulta quindi:

$$s = s_b K_1 K_2 K_3 K_4$$

dove:

K_1 è relativo alla composizione veicolare;

K_2 tiene conto della pendenza dell'accesso;

K_3 è relativo alla localizzazione dell'incrocio nell'area urbana;

K_4 tiene conto del tipo di manovra e delle interferenze con i veicoli e pedoni.

Per accessi impegnati solo da "manovre dirette", in presenza di sole "autovetture", con "pendenza nulla", "senza interferenze" con veicoli o pedoni ed ubicati in "zona residenziali", si è nelle condizioni base di cui sopra e la portata di saturazione s_b vale mediamente:

$$s_b = 1800 \times \text{numero corsie (veic/h)} = 0,5 \times \text{numero corsie (veic/sec)}$$

dove il numero di corsie dipende dalla larghezza dell'accesso (al netto del parcheggio su strada), con una larghezza minima, accettabile nelle aree urbane, di 2,5 m., in assenza di mezzi pesanti.

Per tenere conto della composizione veicolare si fa ricorso al coefficiente k_1 che risulta:

$$K_1 = 1 / \sum_i a_i E_i$$

dove a_i è la frazione del flusso totale composta dai veicoli del tipo i -esimo ed E_i il corrispondente coefficiente che misura l'effetto di ciascun tipo di veicolo in unità autovetture equivalenti (A_e), i cui valori indicativi riportati nella seguente tabella:

Tipo veicolo	E_i
Autovetture	1
Veicoli pesanti	1.75
Autobus	2.25

Tram	2.5
Motocicli	0.33
Biciclette	0.2

È, inoltre, possibile utilizzare i coefficienti di equivalenza per misurare il flusso in arrivo in unità autovetture equivalenti.

Per accessi posti in pendenza, il flusso di saturazione si riduce del 3% per ogni 1% di pendenza in salita e cresce della stessa entità per ogni 1% di pendenza in discesa. Pertanto, denominiamo con i la pendenza in discesa e con $-i$ quella in salita, il coefficiente K_2 di correzione per la pendenza vale:

$$K_2 = 1 \pm 0.03 i$$

Per quanto riguarda gli effetti dovuti alle interferenze con veicoli e pedoni queste aumentano passando dalle zone residenziali a quelle centrali degli affari. Si può tenere conto di questi effetti tramite dei coefficienti K_3 riportato nella seguente tabella:

Localizzazione	K_3
Residenziale	1
Commerciale	0.98
Industriale	0.93
Centro affari	0.85

Se oltre alle manovre dirette sono anche permesse manovre di svolta, si possono avere riduzioni di portata a causa dei seguenti motivi:

- riduzione di velocità per il raggio di svolta;
- interferenze con altri veicoli.

Il coefficiente K_4 che tiene conto di questi effetti è dato da:

$$K_4 = 1 / \sum_i a_i E_i$$

dove a_i è la frazione è la frazione del flusso totale composta dalla manovra di svolta i -esima ed E_i il corrispondente coefficiente che misura l'effetto di ciascun tipo di veicolo in unità autovetture equivalenti che vanno dritto, i cui valori indicativi riportati nella seguente tabella:

Tipo Manovra	E_i
Marcia diretta	1
Svolta a destra	$1 \div 1.25$
Svolta a sinistra	$1 \div 1.75$

Per la svolta a destra il coefficiente aumenta al diminuire del raggio di svolta, per quella a sinistra gioca un ruolo rilevante l'interferenza con i veicoli

provenienti dal verso opposto e pertanto il coefficiente è più elevato. Inoltre, è possibile adottare l'espressione fornita nel seguito per svolte protette.

Quando l'accesso è impegnato solo da manovre di svolta a destra o a sinistra, in assenza di interferenze con pedoni e veicoli (svolta protetta) si applica un coefficiente riduttivo dato da:

$$1 / [1 + (1.5 / r)]$$

dove r è il raggio di svolta in metri.

Quando l'accesso è impegnato solo da manovre di svolta a destra o a sinistra, in presenza di interferenze con pedoni o veicoli (svolta esclusiva permessa) il coefficiente precedentemente definito deve essere ulteriormente ridotto con un coefficiente K_5 che vale:

$$K_5 = 1 - a$$

dove:

$a = 0.05$ per basse portate pedonali di attraversamento (100 ped/h);

$a = 0.15$ per valori medi di portate pedonali (300 ped/h);

$a = 0.25$ per valori alti di portate pedonali (500 ped/h).

Inoltre, in questa condizione, i veicoli che devono svoltare a sinistra devono dare precedenza, alla comparsa del verde, ai veicoli della corrente antagonista proveniente dall'attestamento opposto, che effettuano la manovra diretta o quella di svolta a destra; per questi motivi devono attendere dapprima che si esaurisca la coda che defluisce dall'attestamento opposto alla portata di saturazione e successivamente attendere che si presenti l'intervallo sufficiente per effettuare la manovra. Limitatamente a quest'ultimo periodo (assenze di code dall'accesso opposto), da analisi sperimentali, il flusso di saturazione base deve essere diminuito di una quantità pari a:

$$0.75 f$$

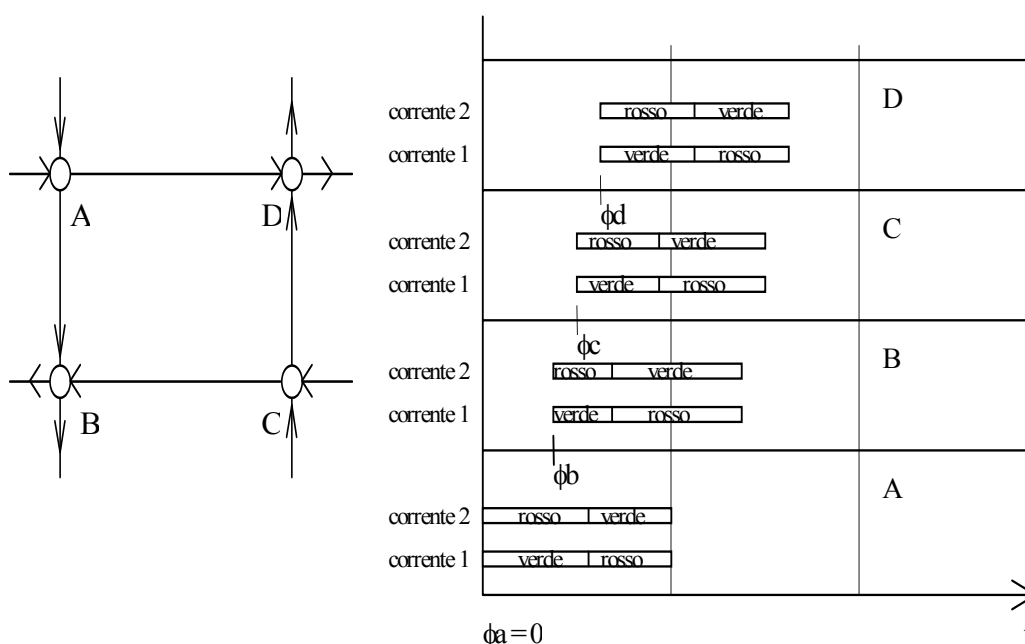
dove f è la somma dei flussi diretti e svoltanti a destra appartenenti alla corrente antagonista.

Appendice C

Esempio di piano di coordinamento

Si consideri una rete costituita da 4 intersezioni (A,B,C,D), come quella in figura. Se ogni intersezione può essere regolata con solo due fasi (per semplicità), un possibile piano di coordinamento della rete di intersezioni è riportato in figura.

La posizione nel tempo del piano semaforico di ciascuna intersezione k , è definita dallo *sfasamento assoluto* (ϕ_k). Scelta per convenzione l'origine dell'asse temporale coincidente con l'origine dell'asse dei tempi di una delle intersezioni, è necessario definire la posizione delle origini degli assi delle altre $n - 1$ intersezioni, pertanto è necessario definire $n - 1$ sfasamenti assoluti. Inoltre, è facile rilevare che è sempre possibile definire gli sfasamenti assoluti ϕ_k nell'intervallo $[0, C]$ dove C è la durata del ciclo



Esempio di piano di coordinamento.

Gli $(n-1)$ sfasamenti indipendenti definiscono, quindi, univocamente il piano di coordinamento della rete di intersezioni con uguale durata del ciclo. Un caso particolarmente semplice si ha nel caso di una arteria, ossia di una successione di intersezioni.

La differenza sull'asse temporale globale tra l'origine del piano semaforico dell'intersezione i e quello dell'intersezione j adiacente si dice *sfasamento relativo* (ϕ_{ij}), risulta $\phi_{ij} = \phi_j - \phi_i$ da cui si ha $\phi_{ji} = \phi_i - \phi_j = -\phi_{ij}$. (È possibile naturalmente definire lo sfasamento relativo anche tra intersezioni non adiacenti). Anche in questo caso è possibile ricondurre lo sfasamento relativo all'intervallo $[0, C]$ aggiungendo un multiplo della durata C agli sfasamenti negativi.

Si può rappresentare una rete di intersezioni con un nodo per ogni intersezione ed un segmento per ogni coppia di intersezioni adiacenti. È sufficiente associare a ciascuno segmento (i, j) , uno solo sfasamento ϕ_{ij}

assumendo per esempio $i < j$, in quanto l'altro sfasamento resta determinato dalla relazione $\phi_{ji} = -\phi_{ij}$. Pertanto, se il numero delle coppie di intersezioni adiacenti è m si devono definire m sfasamenti relativi (in generale se la rete è connessa risulta sicuramente $m \geq n-1$).

Si noti che, in analogia con le maglie di una rete elettrica o idraulica, gli sfasamenti relativi disposti su un circuito L della rete devono soddisfare una relazione di congruenza per la quale assegnato un verso di percorrenza al circuito la somma degli sfasamenti relativi equiversi al verso fissato, meno la somma degli sfasamenti relativi controversi, deve essere uguale ad un multiplo intero della durata del ciclo:

$$\sum_{ij \in L} (\pm \phi_{ij}) = kC$$

Il numero di sfasamenti relativi indipendenti è, quindi, dato da m meno il numero di circuiti, o maglie indipendenti, uguale a $m-(n-1)$. In altri termini il numero di sfasamenti relativi indipendenti è dato dal numero di variabili meno il numero di equazioni non ridondanti, ossia $m - [m-(n-1)] = (n-1)$. Risulta pertanto che il numero di sfasamenti relativi indipendenti coincide con il numero di sfasamenti assoluti indipendenti.

Appendice D

Regolazione semaforica e geometria dell'intersezione

Il comportamento del traffico che si vuole realizzare attraverso la regolazione semaforica pone dei vincoli alla progettazione geometrica dell'intersezione e, inversamente, le caratteristiche di progetto delle intersezioni e dei relativi accessi pongono vincoli determinanti per il controllo semaforico. Il progetto dell'intersezione e quello del controllo semaforico devono quindi essere effettuati congiuntamente.

Si devono dunque soppesare le esigenze delle diverse componenti di traffico ed utilizzare le molteplici possibilità offerte dal controllo semaforico, soprattutto nel caso di limitate disponibilità di spazio.

Nel caso di costruzione di nuove intersezioni, in assenza di vincoli particolari, è opportuno adottare forme standardizzate di intersezione. Lo standard di progetto può in tal caso essere orientato alle esigenze del controllo semaforico. Fondamentalmente si deve tendere a ridurre gli intertempi di sicurezza per le varie correnti agendo sui parametri che li determinano.

Nel caso di intersezioni esistenti i vincoli per l'adeguamento geometrico sono in genere preponderanti, per cui si possono prevedere solamente interventi limitati che tendano comunque a raggiungere forme di tipo standardizzato. Soprattutto in questo caso è necessaria una stretta coerenza fra gli interventi strutturali di tipo geometrico e quelli di controllo semaforico.

Nel seguito vengono trattate alcune delle principali interazioni fra progettazione geometrica e progettazione del controllo semaforico (si vedano comunque le norme relative).

Caratteristiche delle corsie

Il numero delle corsie è legato alle intensità dei flussi e al livello di servizio che si desidera conseguire per le varie correnti di traffico, tenendo conto dei vincoli derivanti dallo spazio disponibile. Nel caso di intersezioni extra-urbane per la definizione delle corsie e del loro utilizzo risultano prevalenti le considerazioni legate alla sicurezza, mentre nel caso di intersezioni urbane sono determinanti gli aspetti legati alle prestazioni.

Corsie per manovre dirette

Per quanto possibile il numero delle corsie per la manovra di uscita diretta devono essere uguali prima e dopo l'intersezione. Soprattutto in ambito urbano può essere peraltro necessario aumentare il numero di corsie disponibili in corrispondenza all'attestamento, al fine di ottenere valori di capacità maggiori.

Se una corsia diretta si affianca ad una corsia di svolta è necessario prevedere una segnaletica orizzontale e verticale chiara che consenta agli utenti di scegliere la propria corsia in modo univoco. La presenza delle corsie di svolta deve comunque essere compatibile con adeguati livelli di capacità per le corsie dirette.

Nel caso di corsie riservate per mezzi pubblici può essere necessario, per ragioni di capacità, interrompere le corsie creando una corsia utilizzabile anche dagli altri veicoli. In tal caso la lunghezza del tratto misto va determinata in modo che, sulla base dei parametri di regolazione, il mezzo pubblico in arrivo

sulla corsia possa oltrepassare l'intersezione dopo l'evacuazione dei veicoli che occupano la corsia stessa.

Il tratto in uscita dall'intersezione per il quale si dovrebbe mantenere inalterato il numero delle corsie presenti in ingresso dipende essenzialmente dal tempo di verde dato alla corrente e dal livello di saturazione della corrente stessa, oltre che da particolari situazioni locali. Orientativamente si può considerare una lunghezza pari numericamente a tre volte il tempo di verde e in ogni modo non inferiore ai 40 metri. Il tratto di raccordo verso un numero inferiore di corsie deve essere per quanto possibile simmetrico e sufficientemente lungo (40÷60 metri), valori che assicurano un andamento sufficientemente fluido per la corrente uscente.

Corsie per manovre di svolta a sinistra

Nel caso in cui la svolta a sinistra sia ammessa si dovrebbe prevedere la presenza di corsie di svolta o di spazi di accumulo per la svolta a meno che i veicoli in svolta non debbano dare precedenza (manovra di svolta a sinistra protetta e contemporanea alla manovra diretta) o siano in numero limitato per cui possono essere contenuti negli spazi di accumulo o, infine, nei casi critici nei quali la coda dei veicoli ostacolati da quelli in attesa per la svolta possa essere gestita con sistemi di controllo della coda.

Nel caso di segnali specifici per la manovra di svolta a sinistra deve essere prevista almeno una corsia dedicata a tale manovra. Nel caso di assi coordinati le corsie di svolta o adeguati spazi di accumulo per la svolta dovrebbero essere previsti nel caso in cui la svolta non è protetta o non vi è spazio sufficiente all'interno dell'area di conflitto per contenere i veicoli in svolta.

Qualora non sia possibile la realizzazione di una corsia o di uno spazio per l'accumulo dei veicoli in svolta e non si possa rinunciare a tale manovra, il traffico dell'attestamento dovrebbe essere controllato separatamente da una propria fase.

Le corsie di svolta a sinistra controllate da apposito segnale dovrebbero avere una lunghezza tale da contenere un numero di veicoli superiore del 20% a quello medio in arrivo in un ciclo (si consideri un ingombro di 6 m/veq). Nel caso in cui la svolta non abbia un proprio segnale ed in assenza di un controllo attuato della coda è necessario prevedere una lunghezza superiore per poter contenere i veicoli che non sempre possono defluire nell'ambito del ciclo.

La lunghezza delle corsie di svolta dovrebbe essere in genere superiore a quella delle corsie dirette, in modo da garantire comunque il loro impegno da parte dei veicoli che devono effettuare tale manovra. Se ciò non è possibile si deve verificare se è possibile ridurre la durata del ciclo oppure se sia praticabile un doppia accensione del verde nel ciclo. In casi critici si raccomanda di utilizzare un sistema di controllo di coda.

Le corsie di svolta a sinistra possono essere realizzate su binari tranviari soltanto nel caso in cui la via libera per il tram sia simultanea con quella per la svolta a sinistra e sia garantita l'evacuazione dei veicoli in svolta in modo da assicurare il passaggio del tram.

Per accessi secondari conviene spesso prevedere divisioni fisiche delle corsie al posto di corsie realizzate con segnaletica orizzontale. In particolare questa soluzione è preferibile nel caso in cui l'impianto semaforico non sia sempre in funzione.

Corsie per manovre di svolta a destra

Corsie specializzate per la svolta a destra possono incrementare la sicurezza e la capacità di un'intersezione. Nel caso di segnali direzionali di svolta a destra devono essere presenti apposite corsie. Deve essere prevista almeno una corsia di svolta a destra nel caso in cui ci sia un'isola spartitraffico triangolare che consenta la svolta su due corsie. Spesso il traffico diretto deve defluire insieme a quello in svolta a destra su di una corsia: per tali corsie dovrebbero essere minimizzati gli ostacoli dovuti alla presenza di altre correnti (ad esempio corsie ciclabili o attraversamenti pedonali) in conflitto con la svolta a destra. Queste correnti possono essere allontanate in modo da creare lo spazio per un veicolo in svolta (non più di 6 metri) purché non si creino problemi di sicurezza dovuti, ad esempio, a scarsa visibilità.

Caratteristiche degli elementi di separazione delle correnti

Isole di separazione longitudinale delle corsie

In relazione al controllo semaforico sono da considerare i seguenti elementi.

- La segnaletica verticale ed i segnali semaforici possono essere ripetuti sulle isole di separazione delle corsie, in modo da essere percepiti più chiaramente dagli utenti;
- In accessi secondari la suddivisione fisica delle corsie consente, nei periodi in cui l'impianto semaforico non è in servizio, di far percepire meglio agli utenti la necessità di dare la precedenza e consente di rendere più sicuro l'attraversamento dei pedoni;
- La suddivisione fisica delle corsie può essere utile per la semaforizzazione degli attraversamenti pedonali in quanto la suddivisione dell'attraversamento consente di utilizzare tempi di sicurezza inferiori. Le suddivisioni devono essere in tal caso in grado di contenere i pedoni, in condizioni di sicurezza, se l'attraversamento viene realizzato in più fasi;
- Nel caso di svolte a sinistra non protette le suddivisioni fisiche possono ridurre lo spazio a disposizione, soprattutto in presenza di traffico pesante, per il quale possono essere necessari raggi di raccordo elevati;
- Se le corsie contrapposte dedicate alle svolte a sinistra non sono in asse, in generale si presentano problemi di visibilità che possono dar luogo a situazioni di pericolo. In tal caso è necessario vietare una manovra o introdurre fasi semaforiche separate.

Isole spartitraffico

Le isole spartitraffico sono utilizzate per incanalare le correnti di traffico, per la protezione di pedoni o ciclisti e per il posizionamento di arredi semaforici o di segnaletica verticale.

Generalmente le isole spartitraffico triangolari sono utilizzate per facilitare il deflusso delle manovre di svolta a destra. Per il controllo semaforico tali isole possono essere utili in quanto riducono le lunghezze degli attraversamenti pedonali e consentono di ridurre lo spazio di conflitto dell'intersezione con conseguente riduzione dei tempi di sicurezza. Infine su queste isole sono facilmente posizionabili segnali verticali e lanterne semaforiche.

Per pedoni e ciclisti le isole possono presentare anche svantaggi. Nel caso di isole di dimensioni elevate i pedoni sono costretti ad effettuare tragitti più lunghi e talvolta si presentano problemi di visibilità o di sicurezza sia per i pedoni sia per i cicli, se la manovra di svolta non è controllata.

Isole di piccole dimensioni sono da utilizzare soltanto per il posizionamento di segnali o nel caso di svolte a destra molto intense. Isole di dimensioni elevate sono adatte soprattutto nel caso di svolte limitate non controllate e come zona di attesa per pedoni e ciclisti.

Una corsia di svolta a destra può essere non segnalata nei seguenti casi:

- Traffico limitato di attraversamento di pedoni e cicli;
- Traffico limitato in svolta sulla corsia;
- Il raggio di curvatura della corsia è inferiore ai 40 metri per cui la velocità dei veicoli in svolta è limitata.

Nel caso di svolta non segnalata si devono mettere chiaramente in evidenza le condizioni di conflitto attraverso l'uso di segnaletica orizzontale e verticale: in particolare deve essere tracciato l'attraversamento pedonale, utilizzando anche l'apposito segnale verticale.

Nel caso di costruzione di nuove intersezioni o di revisione di intersezioni esistenti sarebbe opportuno esaminare la possibilità di rinunciare all'utilizzo delle isole nell'interesse del traffico non motorizzato.

Linee di attestamento

La linea di attestamento per il traffico veicolare dovrebbe trovarsi ad una distanza di 3,50 metri dal segnale (e comunque non inferiore ai 2,50 metri). Nel caso di attraversamenti pedonali la linea va posta ad una distanza non inferiore al metro dall'attraversamento stesso.

Nel caso di corsia ciclabile affiancata con attestamento differenziato la linea di tale attestamento dovrebbe essere collocata a non meno di 1 metro prima dell'attestamento veicolare, in modo da consentire ai conducenti dei veicoli di vedere la presenza di ciclisti e da ridurre per questi i tempi di sicurezza.

Nel caso in cui i veicoli in svolta invadono parte delle corsie del traffico antagonista, a causa di spazi di manovra ristretti, la linea di attestamento del traffico antagonista può essere arretrata. L'arretramento deve essere limitato allo stretto necessario. Nel caso di più corsie a disposizione per il traffico

antagonista le linee di attestamento di tali corsie possono essere scalettate in modo da creare lo spazio per la manovra di svolta.

Segnaletica orizzontale

La segnaletica orizzontale deve essere effettuata nel rispetto delle norme del Codice della Strada e del relativo Regolamento. Nel caso di intersezioni semaforizzate la chiarezza della demarcazione delle correnti non deve essere penalizzata da un eccesso di segnaletica.