



Politecnico di Milano
Facoltà di ingegneria edile architettura
Corso di studi in ingegneria dei sistemi
edilizi

**Gli effetti delle esplosioni contro gli edifici: sistemi di
protezione e prevenzione nei riguardi degli attacchi
terroristici.**

Relatore: Prof. Sergio Tattoni

Allievo: Agostino Amoretti, matricola n° 801831

Anno accademico 2013/2014

Sommario

Abstract	4
Premessa	6
1-Esplosioni	8
Classificazione delle esplosioni	9
Classificazione degli esplosivi	9
Onda d'urto in aria da un esplosivo dirompente	10
Onda d'urto in aria da un'esplosione generata da una nuvola di vapore	11
Parametri di base del fronte d'onda	11
Interazione tra l'onda di blast e una struttura	13
Esplosioni all'interno di ambienti confinati	19
2-Risposta strutturale al blast load	21
Struttura elastica SDOF	21
Fase positiva lunga in relazione con il periodo della struttura	22
Fase positiva corta in relazione con il periodo della struttura	22
Fase positiva simile al periodo della struttura	23
Valutazione dei limiti di risposta	23
Iso - damage diagrams	25
Funzione di resistenza	27
3-Progettazione di elementi strutturali	28
Elementi strutturali in acciaio	28
Comportamento dell'acciaio	30
Connessioni e rinforzi	30
Elementi strutturali in cemento armato	31
Comportamento del cemento armato soggetto a carico di blast	33
Rinforzi per il cemento armato soggetto a blast load	35
Rottura e spalling del cemento armato soggetto a blast load	36
Confronto della risposta tra cemento armato e acciaio	37
Progetto di elementi in muratura per resistere ai blast load	37
4-Risposta degli edifici	40
Collasso sproporzionato – collasso progressivo	40
Introduzione dei requisiti di robustezza nelle linee guida nazionali	46
Tollerabilità del rischio di collasso sproporzionato	47
5-Progetto degli elementi vetrati	51
Tipi di vetro e comportamento contro i blast loads	54
Tipologie di rinforzi	57

Tipologie di telaio.....	58
6-Protezione e prevenzione da attacchi eseguiti con veicoli bomba	61
Diverse tipologie di minacce.....	63
Gestione del traffico.....	64
Vehicle security barriers (vsb)	72
Barriere di sicurezza passiva per i veicoli	73
Barriere di sicurezza attiva per i veicoli.....	77
Sistemi di fondazione per le barriere.....	82
Caso di studio: le strade di Washington.....	85
Conclusioni	99
Indice delle figure	101
Bibliografia.....	104

Abstract

Italiano

Il profondo cambiamento delle modalità di condurre le guerre avvenuto nella seconda metà del '900 ha visto un notevole incremento degli attacchi terroristici, ponendo in primo piano lo studio degli effetti delle esplosioni sugli edifici civili e di conseguenza gli accorgimenti progettuali finalizzati all'irrobustimento strutturale e alla salvaguardia degli utenti. Questa materia sta trovando sempre più interesse e consenso viste le difficoltà riscontrate nella lotta al terrorismo, un nemico imprevedibile, che si nasconde all'interno della popolazione e si espone solamente quando colpisce, per cui è evidente come sia più facile ed efficace cercare di limitarlo, piuttosto che combatterlo.

Il punto di partenza per lo sviluppo dei sistemi di protezione sono state le conoscenze fornite dalla letteratura militare, adattate alle esigenze dei contesti urbani e civili alla luce dell'analisi statistica delle modalità e delle caratteristiche riscontrate negli attentati. Attraverso questo studio vengono individuate come minacce principali gli attacchi eseguiti mediante auto bomba, in quanto risultano i più frequenti per la versatilità del mezzo utilizzato e l'ingente quantitativo di esplosivo trasportabile. I sistemi difensivi vengono pertanto ideati nel rispetto di tre strategie correlate l'una con l'altra:

1. stabilire un perimetro sicuro, ovvero assicurare una determinata stand off distance in modo da tenere l'ordigno il più lontano possibile dall'obiettivo;
2. minimizzare la formazione di detriti a seguito della rottura degli elementi vetrati e delle partizioni, che risultano il principale pericolo per la vita degli utenti;
3. prevenire il collasso progressivo, modellando la struttura in modo che sviluppi una adeguata ridondanza a seguito della perdita di uno o più elementi.

Bisogna comunque considerare che l'obiettivo non è soltanto la protezione, sarebbe infatti facile ottenerla predisponendo difese efficaci come muri in cemento armato o edifici bunker, ma riuscire a realizzare dispositivi in grado di integrarsi con il contesto urbano esistente, senza apparire come tali, in quanto si trasmetterebbe alla popolazione un sentimento di paura e legata al sentore di una costante minaccia, che, secondo il governo americano, destabilizzerebbe le basi su cui si regge una nazione libera e democratica.

English

The profound change in the mode of conducting the wars in the second half of the '900 has seen a significant increase in terrorist attacks, placed its focus on the study of the effects of explosions on civilian buildings and consequently the structural design features aimed to the strengthening and to safeguard users.

This matter is finding more and more interest and consent cause the difficulties encountered in combating terrorism, an unpredictable enemy that lurks within the population, and is exposed only when it hits, it is evident that it is easier and more effective to try to limit rather than fight it.

The starting point for the development of protection systems have been the knowledge provided by the military literature, adapted to the needs of urban and civil context looking at the statistical analysis of the terms and characteristics seen in the attacks. Through this study are identified as key threats the attacks carried out by car bomb, since they are the most utilized due to the versatility of the used mean and the large quantity of explosives transported.

Defensive systems are therefore designed in respect of three strategies related to each other:

1. Establish a secure perimeter, necessary to ensure a certain stand off distance in order to keep the bomb as far as possible from the target;
2. Minimize the formation of debris after the collapse of the glass elements and partitions, which are the main danger to the life of the users;
3. Prevent progressive collapse, shaping the structure so that developments adequate redundancy due to the loss of one or more elements.

We must consider, however, that the goal is not only protection, it would be easy to obtain it providing defenses such as reinforced concrete walls or bunker buildings, but being able to produce devices that can integrate with the existing urban context, without appearing protective elements, because they could transfer to the population a feeling of fear and linked to the scent of a constant threat, which, according to the U.S. government, undermine the basic premise on which rests a free and democratic nation.

Premessa

Fin da quando ero bambino sono stato un grande appassionato della storia del XX secolo, dei suoi personaggi, delle guerre e delle battaglie che l'hanno segnata. Per questo motivo, quando ho avuto la possibilità di studiare gli effetti delle esplosioni sugli edifici e i metodi per proteggerli, mi è sembrato di tornare indietro nel tempo e di poter approfondire una materia che da sempre mi aveva interessato.

Al di là di queste considerazioni puramente personali, il corso della storia ha reso sempre più di attualità questo argomento, per via del profondo cambiamento avvenuto nel modo di condurre le guerre a partire dalla seconda metà del '900: non esistono più i campi di battaglia e gli eserciti avversari che si affrontano a viso aperto, oggi il nemico principale è il terrorismo, un avversario dalle svariate identità, che si nasconde all'interno della popolazione civile e che colpisce per destabilizzare l'opinione pubblica, creando un clima di terrore e un senso di vulnerabilità al fine di diffondere il messaggio della causa per cui lotta.

Dal momento che il loro obiettivo è "far conoscere una causa", gli attentati devono far rumore e scuotere la popolazione, perciò non vengono attaccati obiettivi militari, ma edifici, luoghi pubblici e monumenti simbolo, ponendo così il problema e la necessità di proteggerli e rendere il più possibile sicuro il suolo nazionale.

Ciò rappresenta già una vittoria per una ipotetica organizzazione terroristica, perché senza neanche intervenire pone i governi sotto pressione, costringendoli ad adottare provvedimenti per la sicurezza, che riguardano sia la sfera dei diritti del singolo cittadino, sia sistemi specifici di difesa per gli obiettivi sensibili.

Proprio questi ultimi, con riferimento particolare agli edifici e al contesto urbano, sono l'argomento principale di questa trattazione, basata sulla raccolta degli studi effettuati dai maggiori enti esperti in materia, e rielaborati in modo da realizzare una guida per poterli conoscere, riconoscere in loco, ed eventualmente progettarli.

La tematica, complessa per la molteplicità di variabili in gioco e l'assenza di una vera e propria letteratura, al di fuori di quella militare, purtroppo difficilmente accessibile da parte del pubblico, sarà affrontata in modo da mettere in luce i pericoli principali rappresentati da un'esplosione e i modi, in accordo con le linee guida normative, per prevenirli. Il tutto tenendo conto che non è difficile approntare difese efficaci, basterebbe per esempio chiudere l'accesso a un intero quartiere, erigere alte recinzioni in muratura, realizzare edifici-bunker, ma l'aspetto critico è saper predisporre difese sostenibili dal punto di vista economico-protezione-rischio e soprattutto in grado di integrarsi con l'ambiente circostante, senza condizionare la vita dei cittadini, o, come sostenuto dalla National Capital Planning Commission, "They communicate fear and retrenchment and undermine the basic premises of an open and democratic society".

La tesi si articola in sei capitoli, di cui i primi due trattano la teoria dei meccanismi che regolano le esplosioni e la risposta delle strutture; nel terzo si introducono i principi per il progetto degli elementi strutturali; nel successivo si presenta la risposta degli edifici, con particolare riferimento al concetto di collasso progressivo; nel quinto viene esposta l'importanza della scelta tra le varie tipologie di vetri presenti sul mercato e le

problematiche ad essi legate; infine nel sesto vengono proposte le misure per costituire un perimetro di sicurezza intorno agli edifici, in grado di difenderli dalla principale arma utilizzata negli attacchi terroristici: le auto bomba.

1-Esplosioni

Berthelot, illustre chimico francese del XIX secolo, definì l'esplosione come una rapida espansione di gas in un volume molto più grande di quello iniziale con effetti sonori e meccanici notevolmente intensi. Caratteristica essenziale del fenomeno è infatti l'istantaneità, l'energia liberata deve essere sprigionata in un tempo brevissimo per accumularsi nel punto di scoppio prima di essere dissipata.

Questa definizione molto generale consente di suddividere le esplosioni in tre classi dipendenti dalla loro natura e classificarle come eventi fisici, nucleari o chimici.

Esempi di esplosioni fisiche possono essere rappresentati dal guasto di una bombola di gas compresso, dall'eruzione di un vulcano o dalla violenta miscelazione di due liquidi a temperature diverse.

Un' esplosione chimica comporta la rapida ossidazione degli elementi di combustibile, generalmente atomi di carbonio e idrogeno, che costituiscono il composto esplosivo, al cui interno è presente anche l'ossigeno necessario per far avvenire la reazione.

Un esplosivo chimico, per essere utile, deve poter esplodere solo quando richiesto e deve essere inerte e stabile in condizione di quiete. Le sue applicazioni pratiche vengono poi definite in base alla sua velocità di reazione, che sarà comunque molto maggiore rispetto alla combustione di un composto in aria atmosferica.

Quando l'esplosivo reagisce, si decompone violentemente sprigionando calore e producendo gas, la cui rapida espansione produce pressioni su qualunque materiale con cui l'esplosivo è in contatto o onde d'urto se l'espansione avviene in aria o acqua. La maggior parte degli esplosivi in uso comune sono "condensati", si possono trovare sotto forma di solido o liquido. L'esplosione di una nuvola di vapore è differente da un'esplosione derivante da elementi condensati, in quanto il vapore combustibile è disperso attraverso un elemento ossidante, solitamente aria, e innescato da una sorgente puntiforme.

La miscela combustibile-ossidante è progressivamente coinvolta in una reazione chimica che è generalmente deflagrante, l'espansione dei prodotti di combustione produce un'onda di pressione che incrementa l' accelerazione della reazione chimica stessa.

Questo tipo di esplosione è uno dei rischi che accorrono nei processi produttivi industriali, in particolare alimentari, oleari e petroliferi.

Menzione deve essere fatta anche per esplosioni di tipo "combustibile-aria" che possono produrre danni alle strutture paragonabili a quelli prodotti da potenti esplosivi condensati.

Gli armamenti combustibile-aria, che rappresentano l'applicazione militare di una esplosione per nube di vapore, vengono azionati mediante un detonatore incorporato, che provvede all'accensione di una certa quantità di carburante nebulizzato. Il potere distruttivo di questi ordigni deriva dal fatto che l'esplosione è in grado di fornire una forte pressione per una durata relativamente lunga. Sebbene in tali eventi la reazione chimica è generalmente di tipo deflagrativo, e quindi in grado di produrre pressioni minori rispetto a quelle prodotte da una quantità equivalente di esplosivo condensato, si hanno ugualmente effetti distruttivi notevoli dovuti a una durata più lunga dell'impulso, che produce un significativo aumento del carico impulsivo (1).

Classificazione delle esplosioni

La combustione è il termine usato per descrivere qualsiasi reazione di ossidazione, comprese quelle che richiedono la presenza di ossigeno dall'esterno e quelle che utilizzano una quantità di ossigeno che è parte integrante del composto reagente. Definiamo la deflagrazione come un processo di combustione in cui i materiali che la generano si decompongono ad una velocità sensibilmente inferiore rispetto a quella del suono, si tratta dunque di una combustione subsonica, che usualmente si propaga tramite conduttività termica: un materiale caldo, in combustione, riscalda uno strato adiacente di materiale freddo, facendolo infiammare.

La maggior parte del "fuoco" che utilizziamo nella vita di tutti i giorni, dalle fiamme alle esplosioni, è tecnicamente una deflagrazione.

La detonazione invece è caratterizzata da una reazione esplosiva a velocità supersonica che produce un'onda d'urto ad alta intensità, dove il materiale gassoso è in espansione ad alta temperatura, altissima pressione e densità pressoché costante. La densità dei gas combusti aumenta rispetto a quella della miscela fresca, mentre si verifica un rallentamento di questi ultimi rispetto alla velocità di fiamma, che è fortemente supersonica. L'indice di reazione, descritto dalla velocità di detonazione, risulta compreso tra circa 1500 e 9000 m/s, che è sensibilmente più veloce rispetto alla propagazione dei processi termici attivi di una deflagrazione (2).

Classificazione degli esplosivi

Vi sono diversi aspetti per classificare gli esplosivi:

- In relazione alla velocità di reazione:
 - Gli esplosivi lenti (low) sono composti costituiti da un elemento ossidante e uno combustibile, che danno luogo a una deflagrazione in cui il tasso di velocità di propagazione dell'esplosione risulta più lento rispetto alla velocità del suono. Vengono utilizzati come cariche di lancio per armi da fuoco o miscele esplosive come la polvere da sparo.
 - Gli esplosivi dirompenti (high) sono materiali esplosivi che detonano con velocità che varia da 3 a 9 km/s, il che significa che il fronte d'urto passa attraverso il materiale ad una velocità supersonica. Sono solitamente impiegati nel settore minerario, demolizioni e applicazioni militari.
- In relazione alla sensibilità di reazione:

Gli esplosivi primari possono essere facilmente innescati mediante una fonte di calore, come l'accensione di una scintilla, mediante un urto, una scarica elettrica o una frizione. Elementi come fulminato di mercurio e l'azoturo di piombo sono esplosivi primari e vengono utilizzati per i percussori delle munizioni.

Un esplosivo secondario è meno sensibile di un esplosivo primario e richiede sostanzialmente più energia per essere avviato. Ne fanno parte il TNT e l'RDX. Al fine di raggiungere determinati standard di sicurezza, affidabilità e prestazioni, in osservanza anche di aspetti economici, è pratica comune miscelare diversi composti esplosivi. (2)

Per usi commerciali, gli esplosivi sono generalmente realizzati con ingredienti meno costosi come TNT o nitroglicerina che vengono miscelati con nitrati caratterizzati da un basso costo di mercato, e da una vita utile limitata. Gli esplosivi militari sono invece

composti da ingredienti più costosi, quali miscele binarie di composti stabili come RDX o HMX con TNT, e generalmente presentano una lunga vita utile.

A causa di controlli rigorosi nella maggior parte dei paesi che gestiscono l'approvvigionamento di esplosivi di tipo militare come il Semtex, le organizzazioni terroristiche si trovano a dover ricorrere frequentemente a dispositivi esplosivi improvvisati e auto prodotti, realizzati a partire da sostanze chimiche facilmente reperibili sul mercato come fertilizzanti agricoli e liquidi per l'impiego domestico come il perossido di idrogeno. Pur avendo un rendimento inferiore rispetto agli esplosivi di tipo militare, gli ordigni "home made" vengono impiegati in grandi quantità, tali per cui si ottiene un effetto detonante simile a quello di un esplosivo dirompente. (1)

Onda d'urto in aria da un esplosivo dirompente

Quando viene innescato un esplosivo dirompente, si genera per prima cosa gas caldo, prodotto dalla detonazione, che può essere a una pressione di 10-30 GPa e una temperatura di 3000-4000 °C.

I prodotti gassosi tendono ad espandersi e l'aria circostante viene forzata fuori dal volume che occupa, di conseguenza lo strato di aria circostante viene compresso dalla maggior parte dell'energia rilasciata dall'esplosione.

L'onda d'urto viaggia verso l'esterno dal centro dell'esplosione, in quanto viene creato uno squilibrio tra l'aria compressa dell'onda e l'aria indisturbata davanti ad essa, portando l'energia totale del sistema a un valore costante conseguente alla completa detonazione dell'esplosivo, e la pressione sul fronte d'onda a diminuire all'allontanarsi dalla sorgente dell'esplosione.

A causa della sua quantità di moto il gas tende a una sovra espansione, facendo così cadere la pressione in coda all'onda d'urto al di sotto dei valori relativi alla pressione atmosferica.

Viene così a crearsi una fase negativa o di aspirazione, che applica una forza di decelerazione alle molecole di gas circostante che porta ad una inversione di flusso verso il centro dell'esplosione ed infine al ristabilimento dell'equilibrio. (2)

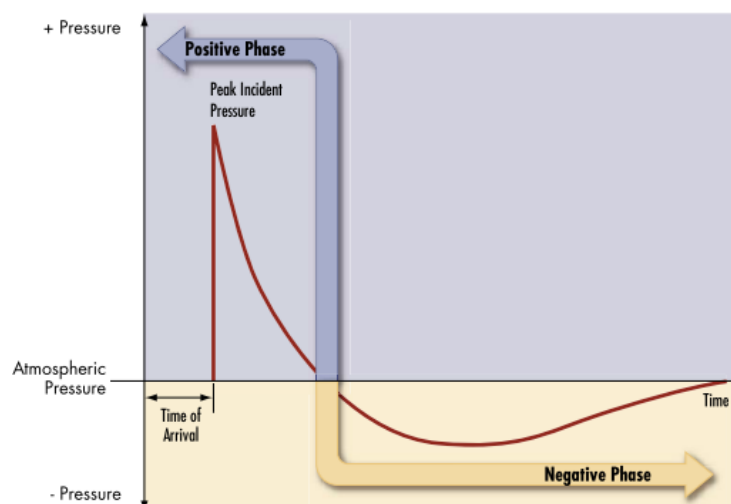


Figura 1. Time history della pressione generata da un'esplosione.(3)

Onda d'urto in aria da un'esplosione generata da una nuvola di vapore

Contrariamente all'esplosione di un ordigno in fase condensata, che è in gran parte indipendente dall'ambiente circostante, le caratteristiche di un'esplosione di una nube di vapore sono altamente dipendenti dal contesto in cui si verifica, in quanto la combustione avviene in un dominio molto più grande e l'onda di pressione, mentre si verifica la fase di combustione, interagisce con la geometria dell'ambiente circostante. Ne risulta quindi che in caso di esplosioni confinate si riscontri un incremento della turbolenza, che provoca un aumento della superficie del fronte di fiamma sul quale avviene la combustione con la conseguente accelerazione del processo di combustione stesso e della velocità del fronte di fiamma in uscita dalla nube di vapore. Questo fenomeno si concretizza in un maggiore picco di sovrappressione.

La forza di un'esplosione di nube di vapore è fortemente dipendente dalla stechiometria della miscela combustibile-aria. Una miscela stechiometrica è tale se porta a un processo di combustione ideale, dove carburante e reagente sono entrambi completamente consumati.

Le miscele possono essere magre, se il combustibile è insufficiente al completo consumo del comburente (generalmente l'aria), oppure ricche, se l'aria è insufficiente e non permette di sfruttare l'intera quantità di combustibile a disposizione. La reazione più performante si ha in prossimità del rapporto stechiometrico.

Il carattere di questo tipo di esplosioni viene anche influenzato dalla posizione del punto di accensione, per via della natura dispersiva del combustibile. Un'accensione centrale può portare a pressioni più alte nelle vicinanze dell'ordigno, per via dell'effetto di confinamento esercitato dai prodotti di combustione. Al contrario un'accensione esterna può essere il caso peggiore per un bersaglio lontano, in quanto viene massimizzata la lunghezza su cui può accelerare il fronte di fiamma turbolento, mettendo grande energia nell'onda di pressione.(2)

Parametri di base del fronte d'onda

Come indicato sopra, una onda d'urto comprende una porzione di aria soggetta a una compressione molto elevata e in disequilibrio con l'aria circostante, condizione per cui tende a propagarsi nello spazio. Il grado massimo di compressione è riscontrabile sul fronte d'onda, e viene quantificato in base al picco di sovrappressione, solitamente denominato picco statico di sovrappressione per distinguerlo da quello dinamico, che indica la pressione agente su un oggetto dovuta alla velocità dell'aria che lo investe (che non corrisponde al fronte d'onda).

La pressione dinamica è funzione dell'energia cinetica dell'aria e può essere scritta come:

$$q_s = \frac{1}{2} \rho u_s^2 \quad (1)$$

La velocità del fronte d'onda dell'esplosione e del picco di sovrappressione si identificano mediante le seguenti relazioni:

$$u_s = a_0 \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \quad (2) \quad q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_0)} \quad (3)$$

Dove p_s è il picco di sovrappressione statica sul fronte d'onda, p_0 è la pressione dell'aria ambiente e a_0 è la velocità del suono.

$$p_s = \frac{6,7}{z^3} + 1bar \quad (p_s > 10bar)$$

$$p_s = \frac{0,975}{z} + \frac{1,455}{z^2} + \frac{5,85}{z^3} - 0,019 \text{ bar} \quad (0,1 < p_s < 10\text{bar}) \quad (4)$$

Z rappresenta la distanza scalata:
$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

Dove R è la distanza dal centro della carica e W è la massa della carica espresso in Kg di TNT. Si utilizza questa unità di misura in quanto risulta un metodo semplice per prevedere gli effetti delle esplosioni, assumendo che esplosioni nelle quali viene rilasciata una data quantità di energia abbiano comportamenti analoghi a quelli ottenuti con un esplosivo di riferimento. Questo consente di convertire l'energia liberata da una certa quantità di un esplosivo o da un composto instabile in una quantità equivalente di tritolo (TNT). Per gli high explosives, l'equivalenza energetica consente di determinare il peso di "TNT equivalente" moltiplicando semplicemente il peso del composto considerato per un opportuno coefficiente di conversione come quelli riportati nella tabella:

Tipo di esplosivo	Coefficiente	Tipo di esplosivo	Coefficiente
TNT	1	RDX	1,25
Torpex	1,23	HMX	1,27
Gelatina dinamite	0,8	Pentrite	1,3
C 4	1,2	Nitroglicerina - dinamite	0,9
Amatol 50/50	0,97	Fulminato di mercurio	0,39
Compaund B	1,15	Pentolite	1,3

Il metodo del TNT equivalente può essere utilizzato anche in presenza di nubi esplosive di vapori, approssimando gli effetti di una deflagrazione a quelli di una detonazione ideale di esplosivo solido. Infatti, benché i due fenomeni siano marcatamente diversi, sapendo che 1 Kg di TNT rilascia circa 4520 KJ/Kg è possibile convertire l'esplosione (dal punto di vista dell'energia immessa nello scoppio) di un certo quantitativo di composto instabile con la seguente relazione:

$$W_{TNT} = \alpha_e \cdot W_{comb} \cdot \frac{H_{comp}}{H_{TNT}}$$

Dove: H_{tnt} = energia di detonazione;
 H_{comb} = potere calorifico inferiore del composto;
 W_{comb} = peso del combustibile contenuto nella nube di gas o vapori;
 α_e = coefficiente (idrocarburi = 0,03; gas medio reattivi = 0,05; gas molto reattivi = 0,1). (1)

Composto	H_{Comb}	Composto	H_{Comb}
Propano	46350 KJ/Kg o 3350 KJ/m ³	GPL	46000 KJ/Kg o 3390 KJ/m ³
Butano	45800 KJ/Kg o 3390 KJ/m ³	Gasolio	46350 KJ/Kg
Metano	50050 KJ/Kg o 3220 KJ/m ³	Cherosene	43300 KJ/Kg
Idrogeno	120000 KJ/Kg o 2970 KJ/m ³	Benzina	43100 KJ/Kg
Acetilene	48300 KJ/Kg o 4380 KJ/m ³	Petrolio greggio	41000 KJ/Kg

Interazione tra l'onda di blast e una struttura

Le forze principali a cui risponde l'edificio sono il picco di sovrappressione incidente, gli impulsi e la pressione riflessa, forze che variano nel tempo e nello spazio sulla superficie esposta dell'edificio, a seconda della posizione della detonazione rispetto alla costruzione.

L'impulso corrispondente al picco di sovrappressione incidente (eq. 4) è rappresentato dal prodotto della pressione per il tempo durante la quale essa agisce. L'impulso è la misura dell'energia impartita da un'esplosione ad un edificio. E' un parametro fondamentale per calcolare la risposta di una struttura e degli elementi che la costituiscono.

Il suo valore è dato dall'integrale della parte positiva della curva pressione-tempo:

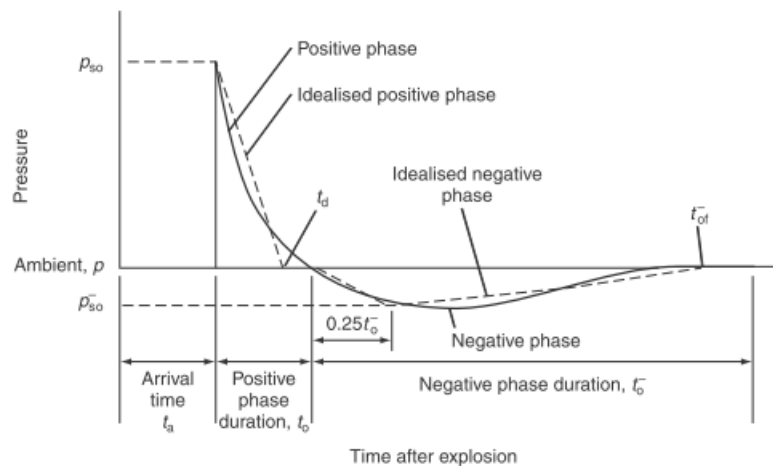


Figura 2. Idealizzazione dell'andamento nel tempo della pressione, indicata dalle linee rette tratteggiate. (2)

$$i_s = \int_{t_A}^{t_o} P(t)dt \quad (6)$$

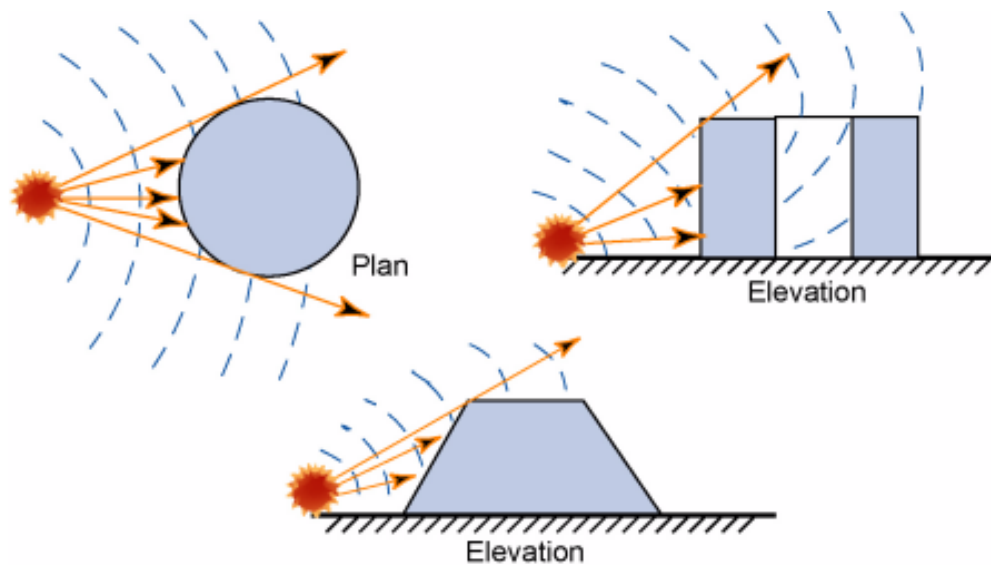
Una simile espressione può essere scritta per un impulso specifico relativo alla time history di una pressione riflessa, che per definizione ha la stessa durata di quella relativa alla pressione incidente.

La variazione di sovrappressione nel tempo è spesso approssimato da un decadimento lineare, la cui durata è identificata dal parametro t_d :

$$t_d = \frac{2i_s}{p_s} \quad (7) \quad \text{cui corrisponde un impulso pari a: } i_s = \frac{1}{2} t_d p_s \quad (8)$$

Quando le particelle d'aria del fronte d'onda diretta, che si propaga radialmente dal punto di scoppio, incontrano una superficie si arrestano bruscamente per invertire il loro moto e originare un fronte d'onda riflessa, notevolmente rinforzato.

Per questo motivo, nel caso di edifici ad alto rischio, è opportuno valutare attentamente le forme dell'involucro, evitando angoli rientranti e sporgenze che potrebbero "intrappolare" l'onda d'urto e incrementarne ulteriormente la forza. Conseguentemente si prediligono forme circolari e superfici inclinate, in grado di smorzare l'effetto dell'esplosione.(4)



SHAPES THAT DISSIPATE AIR BLAST



SHAPES THAT ACCENTUATE AIR BLAST

Figura 3. Forme.

A sinistra esempi di geometrie che minimizzano l'effetto della riflessione, a destra geometrie che la accentuano a causa dell'effetto di confinamento che esercitano sullo sfogo dell'onda di blast.(3)

Le prime applicazioni degli studi sulla relazione tra geometria e esplosione risalgono alla Seconda Guerra Mondiale, figli della necessità di fornire alle navi e soprattutto ai carri armati corazze sempre più sottili e leggere, ma allo stesso tempo efficaci. Queste ricerche si concretizzarono nell'utilizzo di piastre d'acciaio con inclinazioni che raggiungevano i 40° o con sagome arrotondate, che permettevano di incassare i proiettili avversari deviandone la traiettoria e di attutire la forza delle onde d'urto delle esplosioni. Lo stesso principio lo ritroviamo nelle forme delle casematte dei bunker, realizzate in c.a., oltre ad una sagoma bassa e sfuggente, sono generalmente provviste di un arrotondamento delle linee tra le pareti e la copertura.



Figura 4. Evoluzione delle geometrie.

A sinistra: fortificazione del vallo atlantico, struttura in c.a. di grande spessore, si nota la sagoma il più possibile arrotondata per incassare al meglio i colpi di artiglieria e le sollecitazioni date dalle onde d'urto delle esplosioni. Al centro e a sinistra si può notare l'evoluzione delle geometrie dei carri armati, in questo caso tedeschi. Il Tiger 1 dotato di armatura verticale di grande spessore, mentre il Tiger 2 protetto da piastre inclinate.

Da un punto di vista analitico, l'entità della pressione riflessa P_r dipenderà dal valore di quella incidente P_s e da un coefficiente di riflessione C_r che, in presenza di riflessione frontale (angolo d'incidenza nullo, $\alpha=0$) su una superficie infinitamente grande è calcolabile con le seguenti relazioni:

$$P_r = C_r \cdot P_{s0} \quad (\text{MPa}) \quad (9) \quad \text{con} \quad C_r = 3(\sqrt[4]{P_{s0}}) \quad \text{e} \quad P_{s0} \text{ espresso in bar.}$$

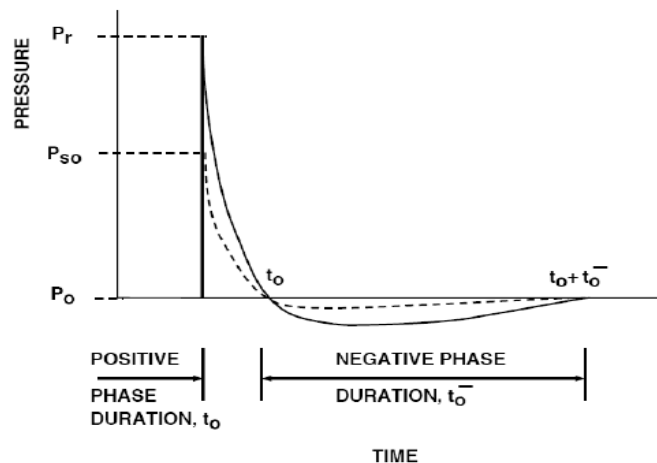


Figura 5. Confronto tra la pressione diretta (tratteggiata) e quella riflessa.

Dal grafico si notano i valori di pressione più grandi della pressione riflessa rispetto a quella diretta, sia in fase negativa, sia in fase positiva. (1)

Nella pratica la determinazione del coefficiente C_r è molto più complessa, perché è influenzata dall'angolo d'incidenza e dalla pressione incidente P_{s0} , come evidenziato nel grafico sottostante.

Nei calcoli, tuttavia, è consentito adottare il valore della pressione calcolato con le

predette formule, valide per riflessione totale, per angoli sino a 45° e ricorrendo al grafico solo per quelli di valore superiore.

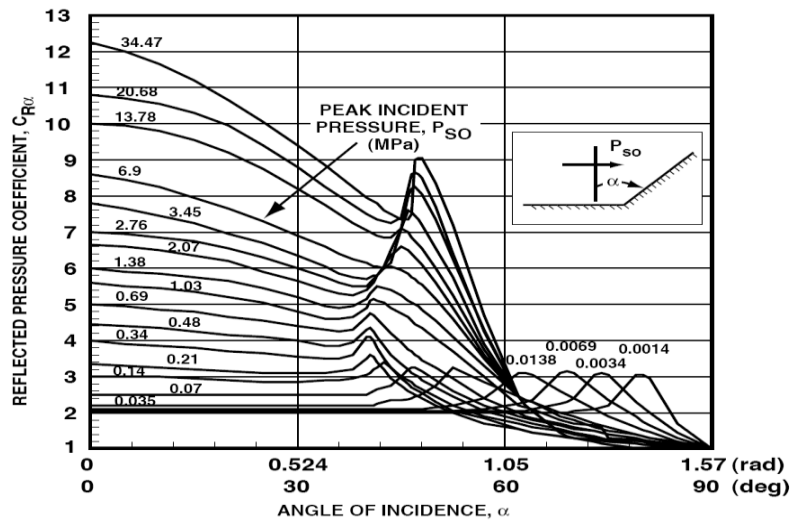


Figura 6. Relazione tra l'angolo di incidenza dell'onda e i coefficienti di riflessione. (1)

Quando l'esplosione avviene appena sopra il suolo, come nel caso di un esplosivo posto all'interno di un furgone, l'onda incidente viene influenzata dalla riflessione del terreno.

I fronti d'onda diretto e riflesso danno origine a un complesso fenomeno caratterizzato dalla presenza di un fronte detto di Mach, come illustrato in figura, in cui si rileva la presenza della pressione incidente e di quella riflessa dal terreno.(1)

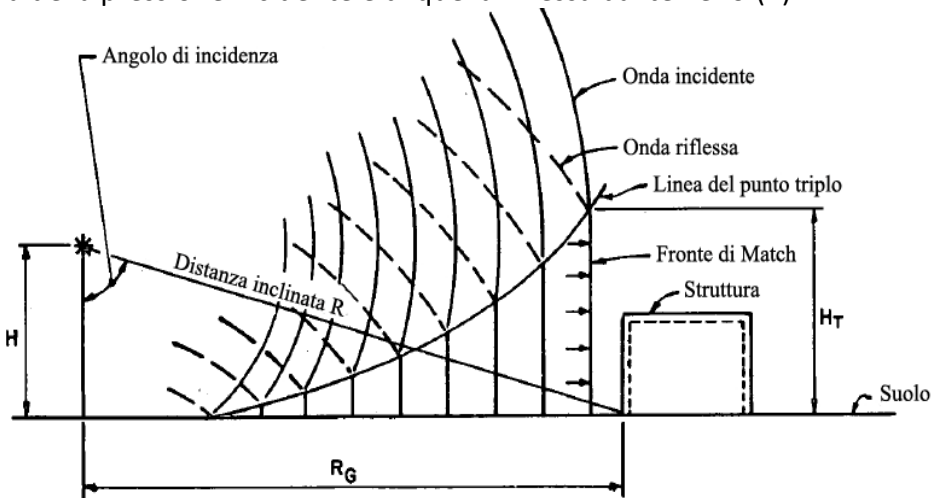


Figura 7. Rappresentazione schematica di come si articola l'onda d'urto a seguito di un'esplosione. (1)

Nelle applicazioni pratiche, in cui vengono considerati bersagli di dimensioni finite, possiamo identificare due classi di interazione tra l'onda d'urto e la struttura.

La prima di queste è associata ad un onda d'urto su larga scala: la struttura investita viene inghiottita e schiacciata. Insiste anche una forza traslazionale, detta carico di diffrazione, che tende a muovere lateralmente la struttura, che tuttavia non viene mossa a causa della sua stazza.

La seconda categoria prevede l'interazione tra un'onda d'urto su larga scala con una struttura piccola come un veicolo: il bersaglio viene nuovamente inghiottito e

schacciato e su tutte le sue facce si manifesta istantaneamente una sovrappressione di schiacciamento.

In questo caso agisce una forza traslazionale in modo più significativo e per un tempo sufficiente a muovere il bersaglio, dal cui effetto scaturisce una porzione sostanziale dei danni arrecati.

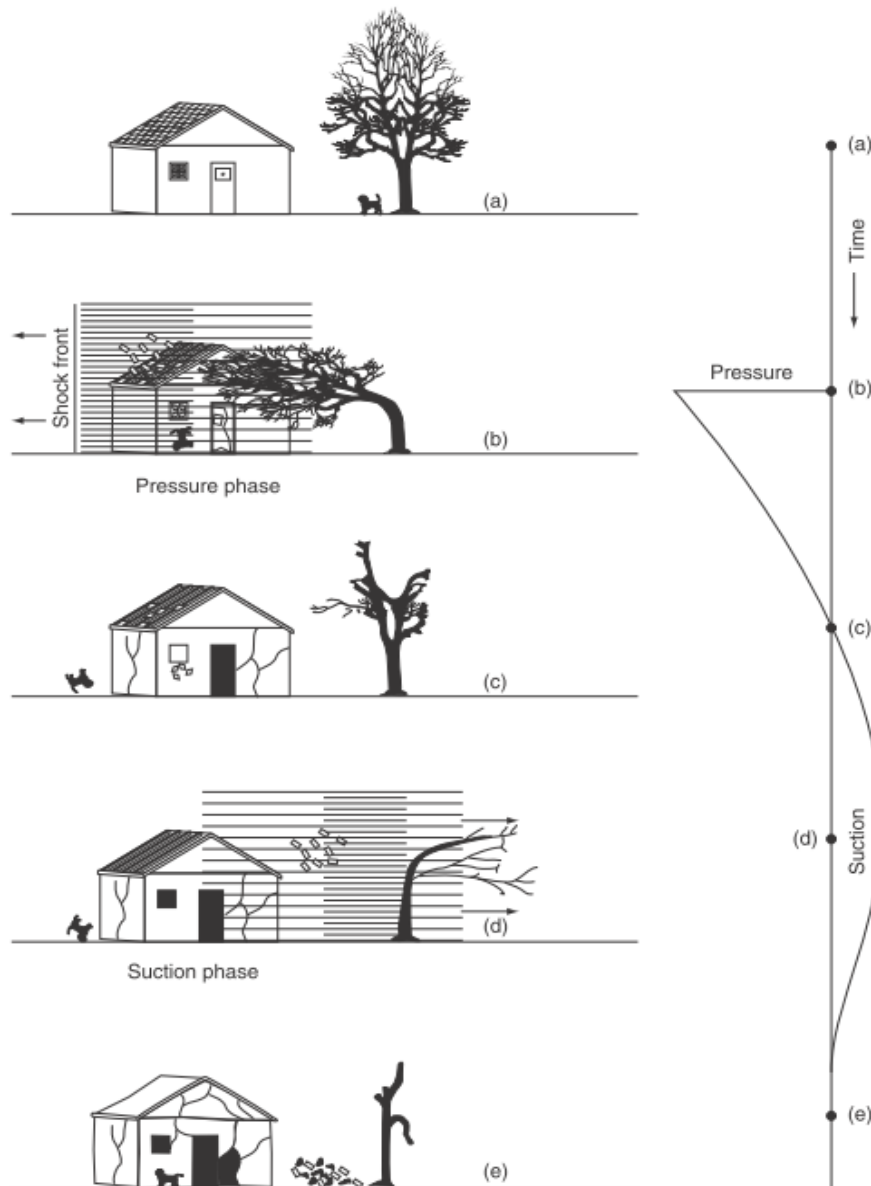


Figura 8. Cane, casa ed albero colpiti dall'onda di un'esplosione. Questa figura mostra il comportamento di tre diverse tipologie di bersaglio. (Arup)

La figura illustra gli effetti di un'onda d'urto prodotta dalla detonazione di una grande quantità di high explosive a una distanza tale da ottenere una durata dell'onda che permetta di scorgere i bersagli in movimento.

La figura (a) rappresenta lo stato di quiete. In figura (b) è riprodotta la risposta dei bersagli subito dopo il passaggio del fronte d'onda. I bersagli più larghi come la casa e l'albero vengono inghiottiti dal processo di diffrazione e tutte le superfici sono investite da un certo valore di pressione. Per esempio il muro sul lato destro della

casa è caricato con una sovrappressione riflessa, mentre la parete frontale è sottoposta a un carico incidente. Gli elementi deboli come i vetri si rompono e i bersagli leggeri, come il cane o le tegole, vengono spostati. Nello specifico, il cane, pur essendo schiacciato dalle onde riflesse ed incidenti, risponde alla pressione dinamica associata alla velocità dell'aria che segue il fronte d'onda. La figura (c) riporta la situazione a successiva alla fase positiva dell'onda. In figura (d) i bersagli sono soggetti alla fase negativa dell'onda, che porta un flusso d'aria di ritorno verso il punto in cui è avvenuta l'esplosione in modo da ristabilire l'equilibrio. Infine in figura (e) sono rappresentati i danni rilevati una volta terminati gli effetti dell'esplosione. Consideriamo infine il caso di un'onda d'urto incidente su una struttura più grande, prodotta dalla detonazione di una carica relativamente piccola. In questo caso i diversi elementi che compongono il bersaglio devono essere analizzati in modo indipendente, in quanto possono essere investiti da differenti sollecitazioni ed in tempi diversi in conseguenza alla diversa esposizione che offrono al fronte d'onda. (2)

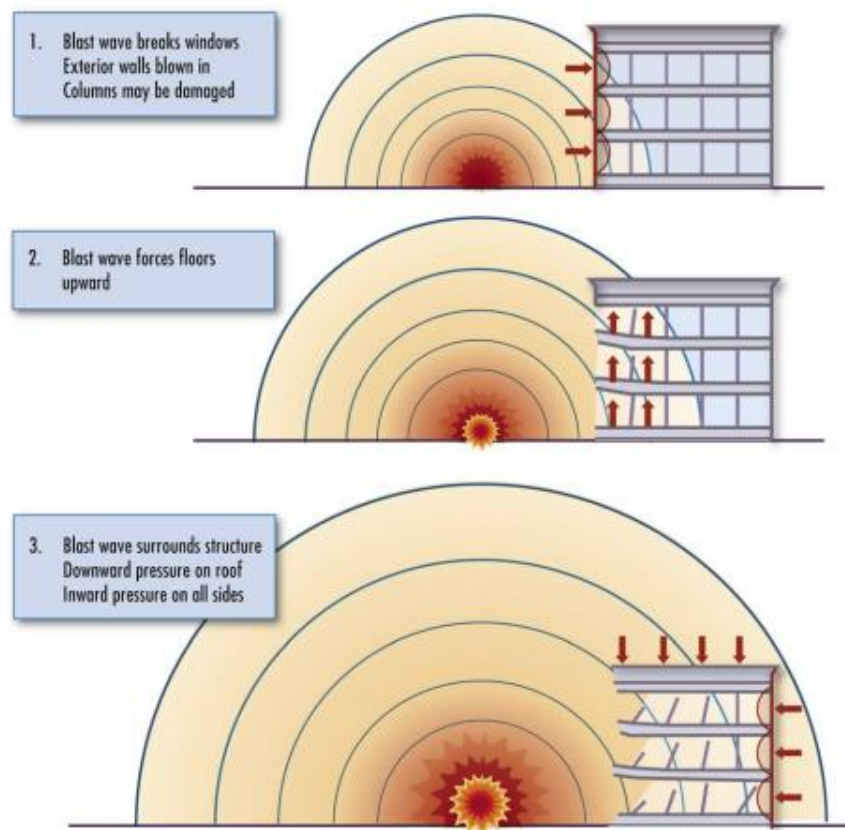


Figura 9. Effetto della pressione dell'onda di blast su una struttura. Vengono prodotti danni ingenti soprattutto perché la struttura viene perturbata da forze aventi direzioni per le quali non è stata progettata, come ad esempio i solai sollecitati dal basso verso l'alto. Inizialmente l'esplosione colpisce la facciata in corrispondenza dei piani bassi, provocando la rottura delle finestre e il crollo dei muri. Continuando la sua espansione l'onda entra nell'edificio, colpendo le partizioni interne e spingendo i solai verso l'alto. Una volta che l'onda ha inglobato l'intera struttura si verifica una pressione di schiacciamento sulla copertura e sulle pareti laterali ed opposte al centro dell'esplosione. (3)

Esplosioni all'interno di ambienti confinati

Nella nostra trattazione consideriamo come ambiente confinato l'interno di un edificio. Un'esplosione interna si può verificare sia a seguito di un guasto dei componenti dello stabile, come una fuga di gas, sia a seguito di un attacco terroristico. Generalmente gli ordigni vengono introdotti personalmente dagli attentatori, e posizionati in prossimità di elementi strutturali o luoghi sensibili, a seconda dell'obiettivo dell'attacco, che può spaziare dall'arrecare il maggior danno possibile piuttosto che bloccare una particolare attività o colpire una persona specifica.

Vi sono diverse modalità di trasporto dell'ordigno:

- "hand carried": dimensioni e relativa potenza limitate, tuttavia si ottengono ugualmente effetti devastanti per via delle innumerevoli riflessioni che occorrono in un ambiente chiuso. L'attentatore trasporta l'ordigno nascosto su di sé o tramite un bagaglio;
- auto bomba: nel caso un edificio sia munito di parcheggio interno, è possibile armare con notevoli quantità di esplosivo un automezzo e introdurlo nello stabile.

Questo è un sistema di attacco molto efficace se si vogliono arrecare danni pesanti all'edificio: nelle autorimesse posizionate nei piani interrati, per motivi di ottimizzazione degli spazi, le colonne sono a vista, per cui può essere molto facile posizionarvi l'ordigno a stretto contatto. Per questi motivi negli edifici sensibili si sconsiglia la presenza di parcheggi non solo all'interno, ma anche nelle strette vicinanze, in modo da garantire una certa distanza di sicurezza (stand off distance);

- granate: è possibile inoltre introdurre all'interno di un bersaglio ordigni esplosivi sparandoli, anche da notevole distanza, con una svariata gamma di armamenti, a partire da lancia granate portatili, lanciarazzi RPG, fino a mortai e cannoni di artiglieria. Chiaramente questi sistemi trovano scarse possibilità di impiego nel mondo occidentale, ma sono largamente diffusi in Medio Oriente. Le armi sopra elencate lanciano un proiettile, dotato di una carica interna, che esplose una volta raggiunto il bersaglio: con le armi portatili è possibile colpire l'interno di un edificio sfruttando per esempio le aperture delle finestre, o murature particolarmente deboli, mentre per le artiglierie vi sono proiettili studiati apposta per esplodere dopo essere penetrati in profondità all'interno del bersaglio.

Per quanto riguarda la dinamica dell'esplosione bisogna innanzi tutto differenziare il caso in cui consideriamo un ambiente completamente chiuso o un ambiente "ventilato", in cui sono presenti aperture in grado di sfogare all'esterno l'energia rilasciata dall'ordigno.

La detonazione di un "high explosive" all'interno di un edificio produce due fasi di carico distinte:

- la prima prevede un carico d'urto riflesso, l'onda iniziale è seguita da diversi impulsi riflessi causati dal riverbero dovuto alle numerose riflessioni dell'onda stessa, che ne amplificano enormemente la potenza;

- la seconda fase di carico si sviluppa invece per via della forte espansione dell'aria impressa dalla combustione dell'ordigno, che provoca un aumento della pressione.

Per questo motivo prevedere delle aperture di sfogo può essere positivo per la protezione di un edificio contro i danni derivanti dall'accumulo di pressioni dovute all'espansione di gas.

Tuttavia l'elemento in grado di attenuare maggiormente gli effetti di un'esplosione interna restano senza dubbio le finestre, che offrono sia uno sfogo per l'accumulo di gas, sia un modo per dissipare le onde prodotte dalla prima fase di carico. (2)

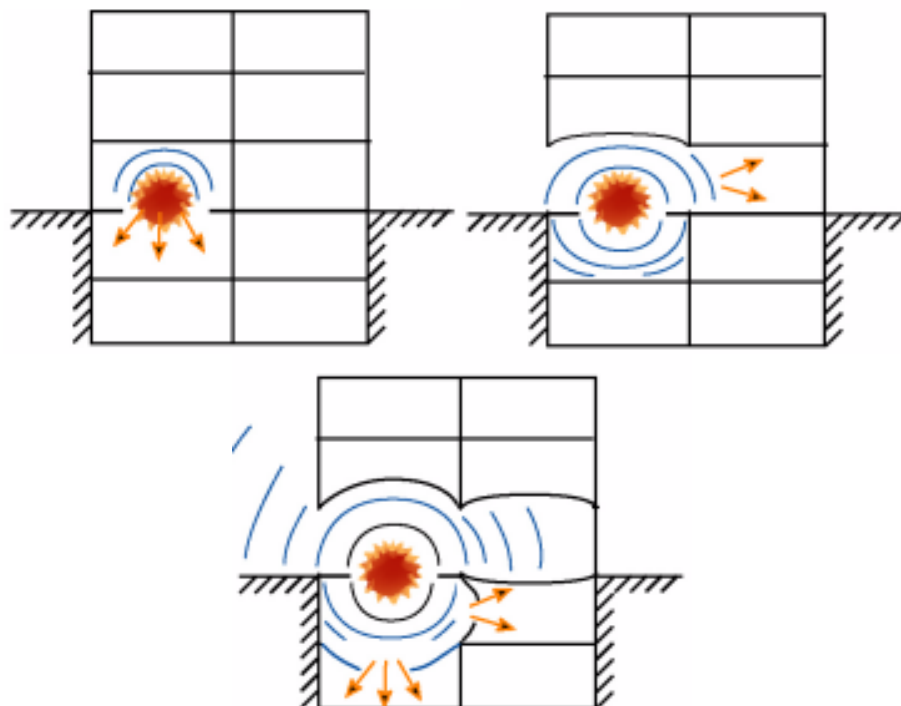


Figura 10. Diverse modalità di danno provocato da un ordigno di piccole dimensioni, tipicamente trasportato a mano all'interno dell'edificio.

In base alla potenza dell'esplosivo, della robustezza strutturale e dalle possibilità di sfogo dell'esplosione, si riconoscono in modo schematico tre possibili comportamenti:

- 1) crollo localizzato del solaio sottostante all'ordigno; 2) crollo del solaio e del soffitto soprastante, rottura delle finestre e delle partizioni verticali; 3) l'onda d'urto si propaga anche all'esterno, crollo dei piani e della struttura verticale delle campate prossime all'esplosione. (3)

2-Risposta strutturale al blast load

Nello studio del comportamento di una struttura sottoposta a blast load l'oggetto principale è rappresentato dal calcolo dello stato finale, piuttosto che una conoscenza dettagliata della sua evoluzione nel tempo. Il principio di questa analisi si basa sulla valutazione della risposta elastica di una struttura a un singolo grado di libertà, costituita da una singola massa concentrata, e in particolare si indaga sul parallelismo tra la durata del carico da scoppio e il periodo di vibrazione della struttura.

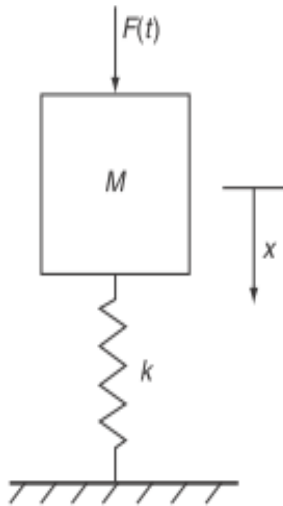


Figura 11. Schema di una struttura elastica a un singolo grado di libertà sollecitata da un'esplosione. (2)

Questo porta ai concetti di regime di risposta quasi statica, impulsiva e dinamica e alla loro rappresentazione mediante curve di danno costante tracciate nel dominio pressione – impulso.

I principi di analisi per un sistema SDOF sono estesi alla modellazione dei specifici elementi strutturali, che possono essere rappresentati come sistemi SDOF equivalenti tramite l'utilizzo di fattori di trasformazione del carico e della massa.

Una volta definito il sistema SDOF, la risposta strutturale può essere rappresentata mediante l'equazione dinamica del moto, con la somma di un termine inerziale dato dalla massa della struttura e un termine dato dalla sua rigidità, determinato in base alla geometria e alle proprietà dei materiali che agiscono in contrasto al blast load.

Struttura elastica SDOF

Si considera una struttura elastica a un singolo grado di

libertà, soggetta a un blast load rappresentato come un impulso triangolare in grado di fornire un picco di forza F. Il blast load imprime una forza definita dalla seguente equazione:

$$F(t) = F\left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad (10)$$

e un impulso pari a: $I = \frac{1}{2} F t_d$ (11)

dove I rappresenta l'area sottesa alla curva che rappresenta la forza F da $t = 0$ a $t = t_d$

In assenza di smorzamento l'equazione del moto risulta pari a:

$$M\ddot{x} + kx = F\left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad (12)$$

Se limitiamo il problema della risposta per periodi di tempo inferiori a quelli della fase positiva la soluzione può essere scritta come:

$$x(t) = \frac{F}{k}(1 - \cos \omega t) + \frac{F}{kt_d} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t\right) \quad (13)$$

con: $\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$ frequenza naturale di vibrazione della struttura.

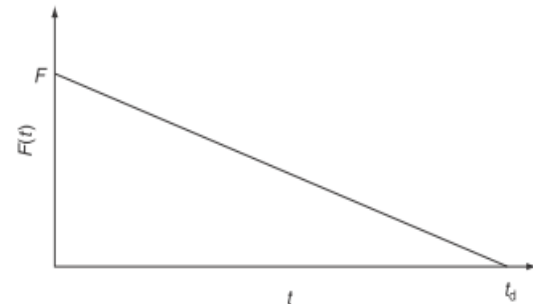


Figura 12. Time history approssimata della forza impressa da un'esplosione (2)

Limitando l'analisi al peggior caso di risposta, il massimo spostamento x_{max} è necessario che avvenga quando la velocità della struttura è pari a zero. L'equazione (13) diventa così:

$$0 = \omega \operatorname{sen}(\omega t_m) + \frac{1}{t_d} \cos(\omega t_m) - \frac{1}{t_d} \quad (14)$$

In questa equazione t_m è il tempo al quale viene raggiunta la x_{max} .

Dalla (14) si ottiene la forma generale:

$$\omega t_m = f(\omega t_d) \quad (15)$$

Fase positiva lunga in relazione con il periodo della struttura

Questa situazione può essere riscontrata nel caso di un'esplosione nucleare o dall'esplosione a grande distanza dal bersaglio di una notevole quantità di high explosive. In questo caso la fase positiva è più lunga del periodo della struttura, il massimo spostamento x_{max} è funzione solamente del picco di carico F e della rigidezza k .

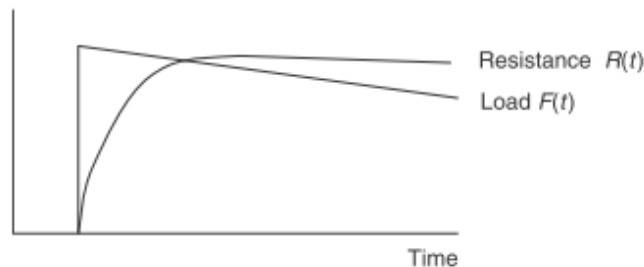


Figura 13. Carico quasi statico (2)

La struttura raggiunge il suo Massimo spostamento prima che il carico mostri significativi decadimenti di forza, perciò viene considerato come una sollecitazione quasi statica.

Fase positiva corta in relazione con il periodo della struttura

Consideriamo ora la situazione in cui la fase positiva è più corta del periodo della struttura. Il carico finisce di agire prima che la struttura abbia il tempo di reagire significativamente, la maggior parte delle deformazioni si verificano per periodi di tempo più lunghi della durata della fase positiva.

Per questo si può affermare che lo spostamento è funzione dell'impulso.

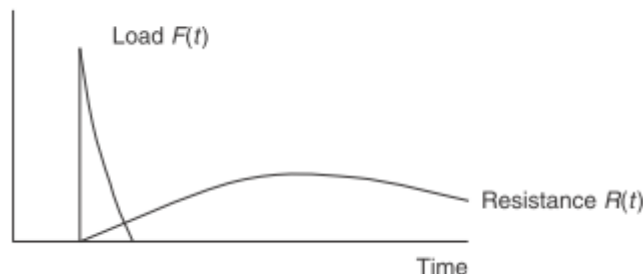


Figura 14. Carico impulsivo (2)

Il grafico mostra come il carico si approssimi allo zero prima che si manifestino degli spostamenti rilevanti. Questo tipo di carico è detto impulsivo.

Fase positiva simile al periodo della struttura

Questo caso è più complesso e richiede la soluzione completa dell'equazione del moto.

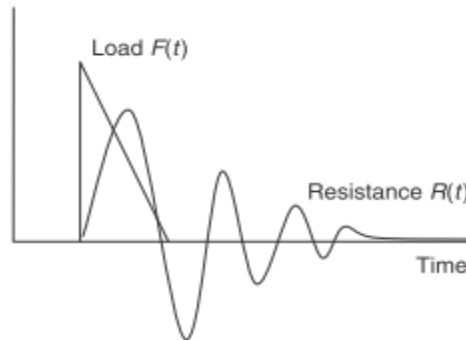


Figura 15. Carico dinamico (2)

I tre regimi impulsivo, dinamico e quasi statico possono essere definiti con le seguenti espressioni:

$$\begin{array}{ll} \frac{t_d}{t} < 0,1 & \text{impulsivo} \\ 0,1 < \frac{t_d}{t} < 10 & \text{dinamico} \\ 10 < \frac{t_d}{t} & \text{quasi statico} \end{array}$$

Valutazione dei limiti di risposta

Nel caso di carico quasi statico, l'impulso di carico può essere idealizzato con la curva riportata nella figura (a), mentre la resistenza alla deformazione è mostrata in figura (b).

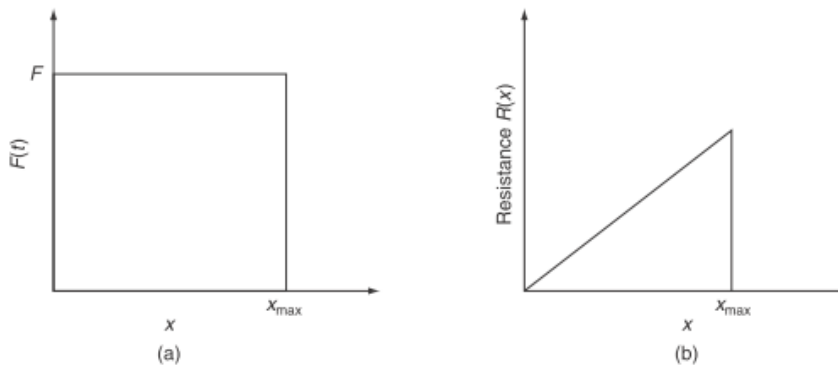


Figura 16. Rappresentazione idealizzata della funzione di carico e di resistenza.(2)

L'analisi può essere effettuata uguagliando il lavoro WD svolto dal carico sulla struttura per raggiungere la deformazione x_{max} con l'energia U acquisita durante la deformazione.

$$WD = Fx_{max} \quad (16)$$

L'energia U è rappresentata dall'area sottesa dalla curva del grafico di figura (b):

$$U = \frac{1}{2} kx_{max}^2 \quad (17)$$

Uguagliando le due espressioni si ottiene:

$$\frac{x_{max}}{\frac{F}{k}} = \frac{x_{max}}{x_{st}} = 2 \quad (18)$$

Dove: x_{st} = spostamento che risulterebbe se la forza F fosse un carico statico;

$\frac{x_{max}}{F/k}$ = fattore di caricodinamico, che identifica il limite superiore della risposta,

ed è chiamato asintoto quasi statico.

Al limite impulsivo, la durata dell'impulso tende a zero, e così la struttura è soggetta a un carico impulsivo idealizzato. Questo produce un istantaneo cambio di velocità, viene assorbito l'impulso e la struttura acquisisce energia cinetica, che viene convertita in energia di deformazione. L'impulso porta una struttura inizialmente ferma ad

acquisire una velocità pari a: $\dot{x} = \frac{I}{M}$, l'energia cinetica acquisita risulta:

$$KE = \frac{1}{2} M \dot{x}_0^2 = \frac{I^2}{2M} \quad (19)$$

Uguagliando con l'energia U si ottiene:

$$\frac{x_{max}}{F/k} = \frac{x_{max}}{x_{st}} = \frac{1}{2} \omega t_d \quad (20),$$

che rappresenta l'equazione di risposta dell'asintoto impulsivo. (2)

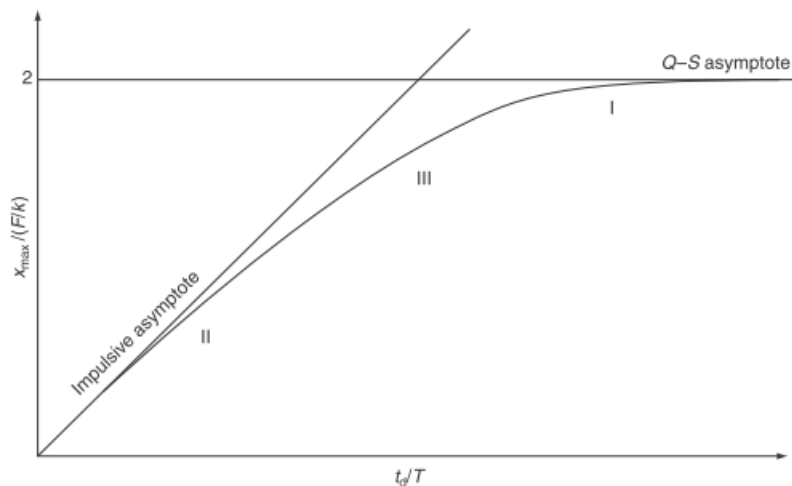


Figura 17. Rappresentazione della risposta quasi statica (I), impulsiva (II) e dinamica (III). (2)

Iso - damage diagrams

Procediamo ora a convertire il grafico sopra riportato a un diagramma (iso – damage diagram), che consente di attribuire ad una determinata combinazione carico – impulso, un determinato livello di danno inflitto alla struttura.

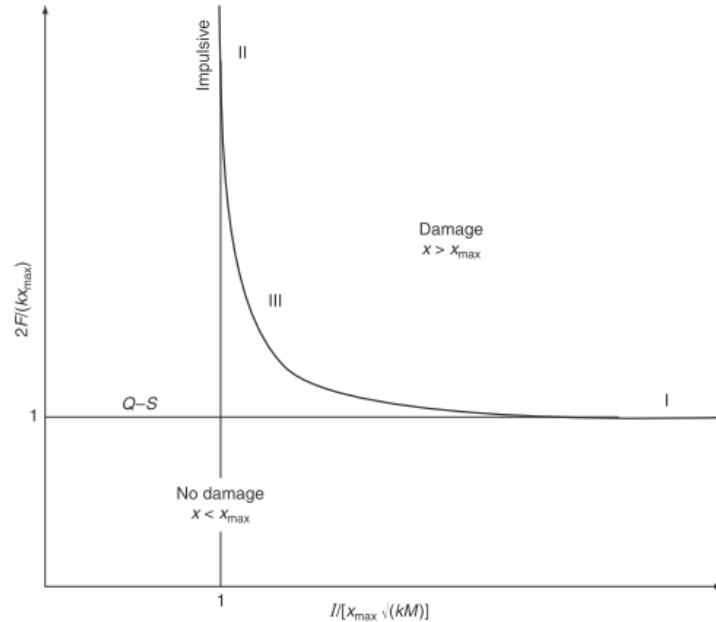
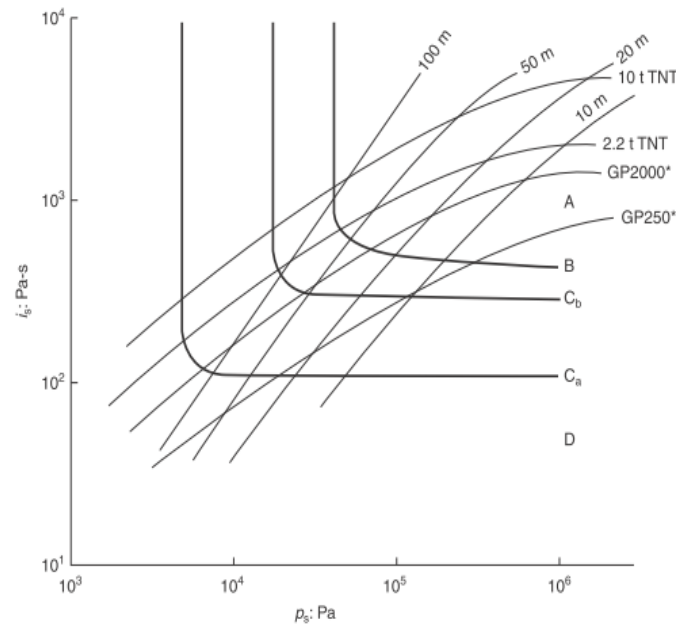


Figura 18. Grafico pressione-impulso, che definisce le condizioni per i quali occorrono i danni. (2)

Le combinazioni carico – impulso che cadono alla sinistra e sotto la curva non inducono a danni consistenti, mentre le combinazioni a destra della curva producono danni che superano i limiti tollerabili. Le curve iso – damage sono ricavate a partire da prove sperimentali, o eventi accaduti realmente, come i bombardamenti avvenuti in Inghilterra durante la Seconda Guerra Mondiale. Proprio i risultati dello studio di questi ultimi vengono utilizzati in Gran Bretagna per determinare le distanze di stand-off per i depositi a rischio esplosione. In questo caso specifico vengono sviluppati dei grafici pressione-impulso, in cui vengono tracciate delle curve che rappresentano i vari livelli di danno:

- A : completa demolizione dell'edificio;
- B : danni considerevoli, edificio non recuperabile e demolizione necessaria;
- C_b: danni in grado di rendere non abitabile l'edificio, crollo della copertura o delle pareti laterali;
- C_a: edificio non abitabile, danni strutturali minori, rottura delle partizioni e delle chiusure trasparenti;
- D: edificio abitabile, rottura locale delle partizioni trasparenti. (5)



*GP2000 and GP250 = General purpose 2000 lb and 250 lb bombs

Figura 19. Curve di danno relative ad un edificio con i tamponamenti in muratura. (6)

La tabella seguente è complementare al grafico precedente, in quanto riporta la sovrappressione incidente e la distanza scalata per alcuni possibili danni ad un edificio sottoposto a cariche di TNT da 1 t e 10 t.

Structural element	Failure mode	1 t TNT			10 t TNT		
		p_s : kPa	Z : m/kg ^{1/3}	R: m	p_s : kPa	Z : m/kg ^{1/3}	R: m
Window panes	5% broken	1.1	72.2	722	0.7	96.0	2068
	10% broken	2.5	38.6	386	1.7	51.6	1112
	90% broken	6.3	19.6	196	4.2	26.9	580
Houses	Tiles displaced	4.5	25.6	256	2.9	34.7	748
	Doors/window frames blown in	9.1	14.6	146	6.0	20.4	440
	Category D	5	23.7	237	3.1	33.6	724
	Category C _a	13	11.4	114	8	16.1	347
	Category C _b	28	6.5	65	17	9.2	198
	Category B	80	3.6	36	36	5.6	121
	Category A	185	2.4	24	80	3.6	78

A partire dalla tabella si evidenzia, per determinare i danni, l'importanza della durata della fase positiva dell'onda di blast al pari del valore di sovrappressione: una carica più grande può provocare lo stesso livello di danno di una carica più piccola, perché, anche se la sovrappressione generata è minore, il dispositivo grande può generare un impulso di maggiore durata. Per questo motivo nel valutare i danni deve essere data all'impulso la stessa importanza del picco di sovrappressione (6).

Funzione di resistenza

Sviluppando la funzione di resistenza per un elemento si nota come venga sviluppata una resistenza flessionale simile nei casi di carico dinamico e quasi statico.

L'unica differenza emerge quando si valuta il carico ultimo, superiore nel caso di carico dinamico.

La funzione di resistenza è essenzialmente un grafico della pressione uniforme necessaria per provocare la flessione in un punto centrale di un elemento. Il grafico mostra una tipica curva resistenza – flessione per un elemento di cemento armato vincolato lateralmente.

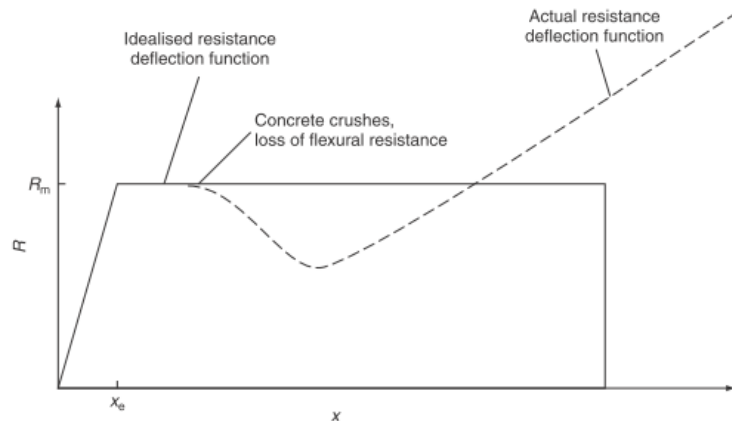


Figura 20. Curva di resistenza-flessione per elementi in c.a.(2)

La porzione iniziale della curva è dovuta prevalentemente all'azione flessionale. Man mano che diminuisce la resistenza flessionale, la presenza di un adeguato vincolo laterale può portare alla formazione di azioni di trazione di membrana, che provocano un aumento della resistenza, come indicato dalla linea tratteggiata nel grafico.

La figura di seguito mostra la funzione di resistenza adottata per una parete in calcestruzzo armato vincolato su due bordi contrapposti, che può essere considerato come una piastra unidirezionale.

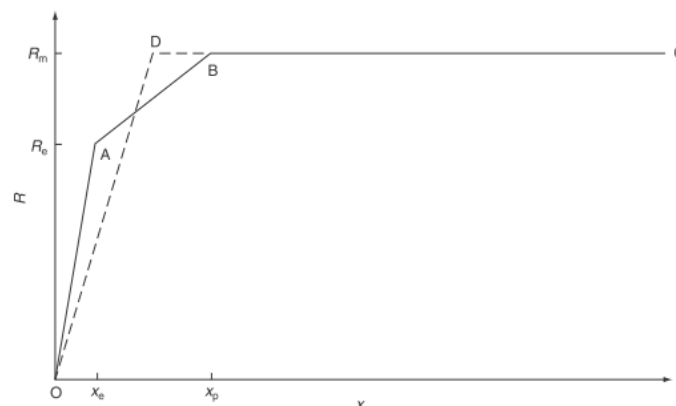


Figura 21. Approssimazione della funzione di resistenza per un elemento in c.a.(2)

Il tratto OA rappresenta la deformazione elastica della piastra. Nel punto A sugli appoggi si innesca un meccanismo di snervamento, che consente una rotazione. In questa fase le deformazioni nel centro della piastra sono ancora in campo elastico, mentre sui vincoli sono in campo plastico. La fase BC rappresenta la resistenza ultima dell'elemento, fino a che l'elemento non si snerva al punto da innescare un meccanismo di collasso, che avviene in corrispondenza di uno dei due vincoli. (2)

3-Progettazione di elementi strutturali

L'obiettivo primario nella progettazione di elementi strutturali resistenti ai blast load è quello di fornire gradi di duttilità che possano permettere un certo valore di deformazione in accordo con i livelli di danno attesi. Il progetto si basa sullo studio del comportamento flessionale, sull'attitudine a plasticizzarsi degli elementi e dei materiali utilizzati, e sulla prevenzione del collasso dovuto ad altri effetti del carico, come il taglio e l'instabilità locale.

Elementi strutturali in acciaio

L'azione dei carichi applicati rapidamente incrementa in modo significativo la velocità di applicazione dello sforzo, influenzando sensibilmente le proprietà meccaniche degli elementi strutturali. Facendo un confronto con le proprietà meccaniche di un materiale soggetto a carico statico, si riportano gli effetti riscontrati:

- la resistenza a snervamento dell'acciaio f_y è incrementata a $f_{y,dyn}$, resistenza a snervamento dinamica;
- il carico di rottura f_u , in cui si tiene conto degli effetti dell'incrudimento, viene aumentato e diviene $f_{u,dyn}$, carico di rottura ultimo dinamico;
- il modulo elastico rimane insensibile alla diversa natura del carico applicato;
- la deformazione a rottura rimane insensibile alla diversa natura del carico applicato.

Il fattore con il quale viene migliorata la resistenza statica viene chiamato fattore di incremento dinamico (DIF), utilizzato per calcolare le resistenze di progetto dei materiali per ogni tipo di sollecitazione.

Type of stress	Structural steel	
	$f_{y,dyn}/f_y^*$	$f_{u,dyn}/f_u$
Bending	1.20	1.05
Shear	1.20	1.05
Compression	1.10	-

* Minimum specified f_y for steel grades up to S355 may be enhanced by the average static increase factor of 1.10.

Figura 22. Fattori di incremento dinamico per elementi strutturali tratti dalla normativa inglese.

Type of stress	Protection category	Dynamic design strength
Bending	1	$f_{yd,dyn} = \frac{f_{y,dyn}}{\gamma_{M0,acc}}$
	2	$f_{yd,dyn} = \frac{f_{y,dyn} + \frac{1}{4}(f_{u,dyn} - f_{y,dyn})}{\gamma_{M0,acc}}$
Shear	1 and 2	$\frac{f_{yd,dyn}}{\sqrt{3}}$

Figura 23. Resistenze dinamiche di progetto per elementi strutturali in acciaio tratti dalla normativa inglese.

Si pone dunque come criterio di controllo della risposta degli elementi un parametro limite della deformazione in grado di controllare il livello di danno, che sarà stabilito in base a cosa si intende proteggere: la struttura dell'edificio piuttosto che i suoi occupanti o le attrezzature al suo interno.

Possono essere usati due parametri per quantificare la deformazione: la rotazione agli appoggi e il rapporto di duttilità, definito dalla seguente espressione:

$$\mu = \frac{\text{deformazione totale}}{\text{deformazione al limite elastico}} = \frac{\chi_m}{\chi_E}$$

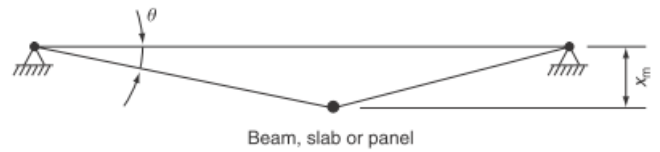


Figura 24. Schematizzazione della deformazione di una trave, piastra o pannello. (2)

	Protection category			
	1		2	
	θ	μ	θ	μ
Structural steel beams and plates*	2°	10	12°	20

* Adequate bracing must be provided to ensure the corresponding level of ductile behaviour.

Figura 25. Limiti di deformazione tratti dalla normativa inglese.

Per proteggere il personale e le attrezzature dai frammenti e dai cedimenti di parti di struttura, si adottano limiti di deformazione definiti dalla categoria 1; la categoria 2 fa invece riferimento alla protezione per prevenire il collasso della struttura. Questi limiti presuppongono elevate deformazioni plastiche degli elementi e dunque la necessità di una loro sostituzione o riparazione per poter rendere nuovamente agibile l'edificio.

Nel caso si voglia garantire il riutilizzo della struttura senza dover intervenire con opere di ripristino e riparazione, è necessario mantenere le deformazione all'interno del campo elastico con $\mu \leq 1$, andando incontro a elementi strutturali molto grandi e dal costo elevato.

In aggiunta a queste considerazioni, che si riferiscono a singoli elementi strutturali, il corpo ingegneri dell'esercito americano raccomanda il soddisfacimento dei seguenti parametri, relativi al complesso strutturale:

- massimo spostamento laterale δ pari a 1/25 dell'altezza di piano H;
- massima rotazione θ pari a 2°. (2) (8)

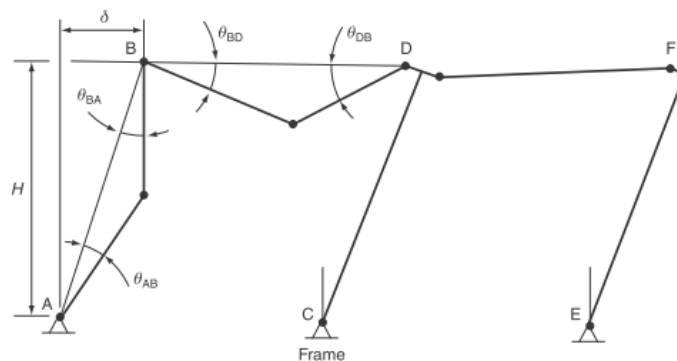


Figura 26. Schematizzazione della deformazione di un telaio. (2)

Comportamento dell'acciaio

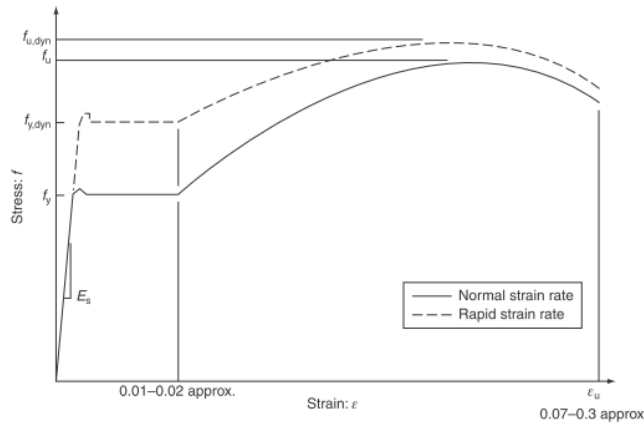


Figura 27. Curva sforzo-deformazione dell'acciaio.

Vengono messe a confronto le curve generate da una sollecitazione breve, con una normale. (3)

L'acciaio presenta un andamento lineare del diagramma sforzo-deformazione fino al raggiungimento dello snervamento, oltre il quale si può deformare senza significativi aumenti dello sforzo.

Dopo questa condizione si verifica l'incrudimento e lo sforzo, dopo aver raggiunto il valore massimo, tende a calare fino a rottura accompagnato da una ulteriore deformazione. Gli acciai delle classi superiori a S355 manifestano piccole deformazioni a rottura e devono essere utilizzati con cautela quando il progetto richiede un livello di duttilità elevato. (2)

Connessioni e rinforzi

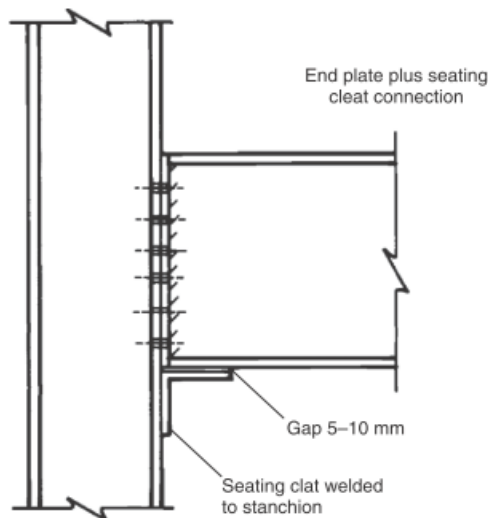


Figura 28. Nodo strutturale di connessione tra trave e pilastro.

Si noti la staffa ad "L" saldata di rinforzo. (2)

Gli elementi che presentano più criticità sono le connessioni, che devono essere in grado di trasferire momento flettente, taglio e azione assiale con adeguata forza, rigidità e capacità di rotazione, per fare in modo che gli elementi strutturali possano raggiungere il massimo valore di momento resistente plastico.

Al fine di scongiurare il crollo per il cedimento di una connessione, è raccomandata, dove possibile, l'installazione di staffe aggiuntive per supportare la trave in caso di cedimento della connessione primaria. Questo accorgimento viene previsto per connessioni particolarmente critiche o vulnerabili come quelle che troviamo ai piani inferiori degli edifici. (2)

Le prescrizioni sopra riportate fanno riferimento al rinforzo in corrispondenza dei nodi, per quanto riguarda invece i singoli elementi strutturali, nel caso specifico i pilastri, si tende a rinforzarli adottando un sistema di rivestimento e confinamento dell'acciaio realizzato mediante uno strato di calcestruzzo. In questo modo si offre protezione ai profili in acciaio e se ne migliora il comportamento grazie all'aumento della massa dell'elemento. Anche in questo caso questo provvedimento viene adottato in corrispondenza dei piani bassi o di zone particolarmente a rischio.

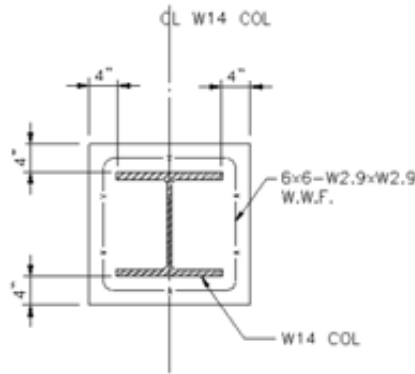


Figura 29. Sezione di un pilastro in acciaio munito di rivestimento in c.a. dello spessore di 4". (9)
 E' anche possibile l'utilizzo di profili in acciaio riempiti di cemento, un'ottima soluzione per sfruttare le proprietà dei due materiali: la massa del cemento e la duttilità dell'acciaio. (9)

Elementi strutturali in cemento armato

Anche nel caso del cemento armato le proprietà meccaniche dei materiali sono influenzate dal tipo di carico agente:

la resistenza a snervamento dell'acciaio f_{yk} è incrementata a $f_{yk,dyn}$, resistenza a snervamento dinamica;

- la resistenza a trazione delle armature kf_{yk} è incrementata a $k_{dyn}f_{yk,dyn}$, resistenza a trazione dinamica;
- la resistenza a compressione cilindrica f_{ck} è incrementata a $f_{ck,dyn}$, resistenza a compressione cilindrica dinamica;
- i moduli elastici del calcestruzzo e dell'armatura rimangono insensibili al tipo di carico.

Le tabelle seguenti riportano i parametri, estratti dalla normativa inglese, da usare per il progetto del calcestruzzo contro carichi dinamici. (2)

Type of stress	Concrete		Reinforcement
	$f_{ck,dyn}/f_{ck}$	$f_{yk,dyn}/f_{yk}$	$(k_{dyn} f_{yk,dyn})/(kf_{yk})$
Bending	1.25	1.20	1.05
Shear	1.00	1.10	–
Compression	1.15	1.10	–

Figura 30. Fattori di incremento dinamico per elementi strutturali tratti dalla normativa inglese.

Type of loading	Protection category	Dynamic design strength	
		Concrete	Reinforcement
		$f_{cd,dyn} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck,dyn}}{\gamma_{C,acc}}$	$f_{yd,dyn}$
Bending	1	$f_{cd,dyn} = \frac{0.85 \times (1.25 \times f_{ck})}{1.2} = 0.89f_{ck}$	$f_{yd,dyn} = \frac{f_{yk,dyn}}{\gamma_{S,acc}} = 1.2f_{yk}$
	2	$f_{cd,dyn} = \frac{0.85 \times (1.25 \times f_{ck})}{1.2} = 0.89f_{ck}$	If $k \leq 1.15$, $k_{dyn} \leq 1.0$ and $f_{yd,dyn} = \frac{f_{yk,dyn}}{\gamma_{S,acc}} = 1.2f_{yk}$ If (for B500C reinforcement) $k > 1.15$, $k_{dyn} > 1.0$ and therefore $f_{yd,dyn} = \frac{(0.75 + 0.25k_{dyn})f_{yk,dyn}}{\gamma_{S,acc}}$
Shear	1 and 2	$f_{cd,dyn} = \frac{1.0 \times (1.00 \times f_{ck})}{1.2} = 0.83f_{ck}$	$f_{yd,dyn} = \frac{f_{yk,dyn}}{\gamma_{S,acc}} = 1.1f_{yk}$
Compression	1 and 2	$f_{cd,dyn} = \frac{0.85 \times (1.15 \times f_{ck})}{1.2} = 0.81f_{ck}$	$f_{yd,dyn} = \frac{f_{yk,dyn}}{\gamma_{S,acc}} = 1.1f_{yk}$

In the above calculation of $f_{yd,dyn}$ for reinforcement in bending for protection category 2, the value of k_{dyn} is calculated from the dynamic increase factors given in Table 7.1:

$$k_{dyn} = 1.05 \frac{k}{f_{yk,dyn}/f_{yk}} = \frac{1.05}{1.20} k = 0.875k$$

Figura 31. Resistenze dinamiche di progetto per elementi strutturali in c.a. tratti dalla normativa inglese.

La scelta dell'espressione da utilizzare dipende dalla categoria di protezione che si vuole rispettare. Come già visto per l'acciaio in fase di progettazione, anche per il cemento armato si fa riferimento a limiti di deformazione da rispettare per poter garantire una determinata categoria di protezione all'edificio. I due parametri di controllo sono rappresentati nuovamente dal rapporto di duttilità μ e dalla rotazione agli appoggi θ :

	Protection category			
	1		2	
	θ	μ	θ	μ
Reinforced concrete beams and slabs	$2^{\circ*}$	Not applicable	$4^{\circ\dagger}$	Not applicable

Figura 32. Limiti di deformazione tratti dalla normativa inglese.

La categoria 1 raccoglie i parametri da rispettare per garantire la protezione del personale e delle attrezzature presenti all'interno dell'edificio, tramite l'attenuazione della pressione dovuta all'onda di blast e dal distacco di frammenti e porzioni di struttura. La categoria 2 invece si adotta se si vuole prevenire il collasso della struttura. I parametri riportati presuppongono la plasticizzazione degli elementi e di conseguenza la loro riparazione o ricostruzione per poter rendere nuovamente agibile lo stabile. Se si vuole evitare la riparazione è necessario mantenere le deformazioni in campo elastico, imponendo che risulti $\mu \leq 1$. (10)

Comportamento del cemento armato soggetto a carico di blast

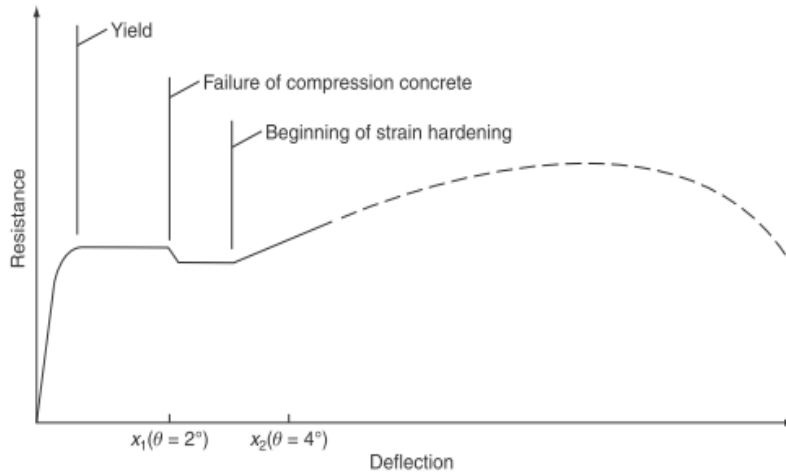


Figura 33. Diagramma sforzo-deformazione per un elemento in c.a. (2)

Un elemento di cemento armato soggetto a un carico dinamico si deforma fino a quando si sviluppa un valore di energia di deformazione tale da bilanciare l'energia rilasciata dall'esplosione. Successivamente l'elemento torna al suo stato di quiete, con la possibilità che si verifichi un certo grado di frammentazione del calcestruzzo. Quando l'elemento viene caricato inizialmente si ha un incremento lineare della curva resistenza-spostamento, fino a quando si verifica lo snervamento dell'armatura. In seguito la resistenza rimane costante mentre lo spostamento aumenta fino a quando, raggiunta una rotazione del vincolo θ pari a 2° , il cemento cede per compressione.

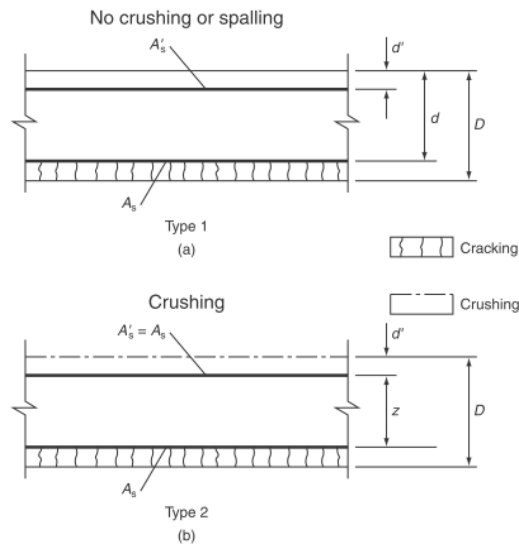


Figura 34. Sezioni trasversali di due travi in c.a. (2)

Tipo 1 armatura in zona compressa assente o comunque diversa da quella in zona tesa; **tipo 2** armatura simmetrica. Si riportano differenti comportamenti alle sollecitazioni.

Per le sezioni come quelle di tipo 1, nell'intervallo compreso tra 0° e 2° il cemento oppone resistenza e il copriferro rimane intatto su entrambe le facce dell'elemento. Gli elementi di tipo 1 possono essere singolarmente o doppiamente armati, anche se l'armatura in zona compressa può essere di aiuto per contrastare gli effetti del "contraccollo".

Per angoli $\theta > 2^\circ$ le forze di compressione vengono trasferite dal cemento alle armature in zona compressa, fenomeno che manifesta una leggera perdita di capacità portante.

In assenza di armatura di compressione la frantumazione per schiacciamento del cemento porterebbe al collasso dell'intero elemento, per questo deve essere prevista una certa quantità di armatura in zona compressa per poter permettere all'armatura tesa di sviluppare completamente la sua capacità portante. A questo proposito si prescrive di adottare in zona compressa un'armatura simmetrica rispetto a quella tesa (sezione di tipo 2).

Le sezioni di tipo 2 sopportano la frantumazione del cemento, che avviene per angoli θ compresi tra 2° e 5° , senza che si verifichi il distacco del copriferro in zona tesa.

Quando il copriferro si rompe o si disgrega senza staccarsi perde la sua funzione strutturale, ma continua a costituire parte della massa dell'elemento e quindi a contribuire alla sua resistenza inerziale. Aumentando ancora la sollecitazione si ha nuovamente un aumento della resistenza e della deformazione a seguito dell'incrudimento dell'armatura. (2)

Una volta raggiunto il valore di deformazione x_2 (corrispondente a $\theta=4^\circ$), la sezione perde la sua integrità strutturale fornita dal nucleo in cemento e dalla gabbia di armatura, iniziando così il processo di collasso. Questo fenomeno può essere evitato con la presenza di "laced reinforcing", una tipologia di armatura che prevede una maglia di ferri piegati che "allacciano" tra loro i ferri longitudinali. Tuttavia questa tipologia di rinforzo non si presta all'utilizzo per gli edifici comuni, a causa della sua complessità di realizzazione e i relativi costi.

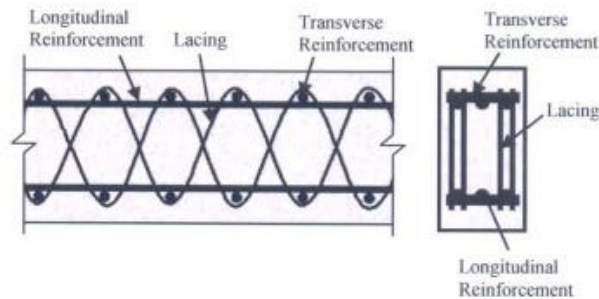


Figura 35. "laced reinforcing". (11)

Anche se poco frequente, si può anche verificare un collasso dovuto a taglio, evento che deve essere evitato prevedendo un'adeguata armatura aggiuntiva, in modo da poter sfruttare a pieno le capacità di resistenza flessionale delle sezioni. Il valore di taglio massimo viene raggiunto quando si raggiunge il valore ultimo di resistenza, perciò i rinforzi a taglio sono determinati in funzione della resistenza in grado di sviluppare l'elemento, non in base al carico applicato. (11)

Rinforzi per il cemento armato soggetto a blast load

Per permettere alle strutture di resistere ai carichi da scoppio è necessario adottare alcuni accorgimenti differenti rispetto ai normali rinforzi, in modo da facilitare lo sviluppo di cerniere plastiche ed evitare il più possibile i comportamenti fragili di alcuni elementi.

La tipologia di acciaio che meglio si presta a questo comportamento a seguito di un carico da scoppio è il B500 C. E' preferibile l'utilizzo di barre di armatura di piccoli diametri poste a brevi interassi in quanto possono sviluppare maggiore duttilità e limitare la possibilità di rottura del cemento prima che si lesioni l'armatura. Inoltre è necessario cercare di evitare interruzioni dell'armatura, in caso contrario, è opportuno sfalsare le sovrapposizioni tra varie le barre, che saranno eseguite in corrispondenza di tratti a momento nullo, in modo da evitare piani deboli.

Lo sviluppo di cerniere plastiche è atteso in corrispondenza dei nodi di giunzione tra i vari elementi che compongono una struttura.

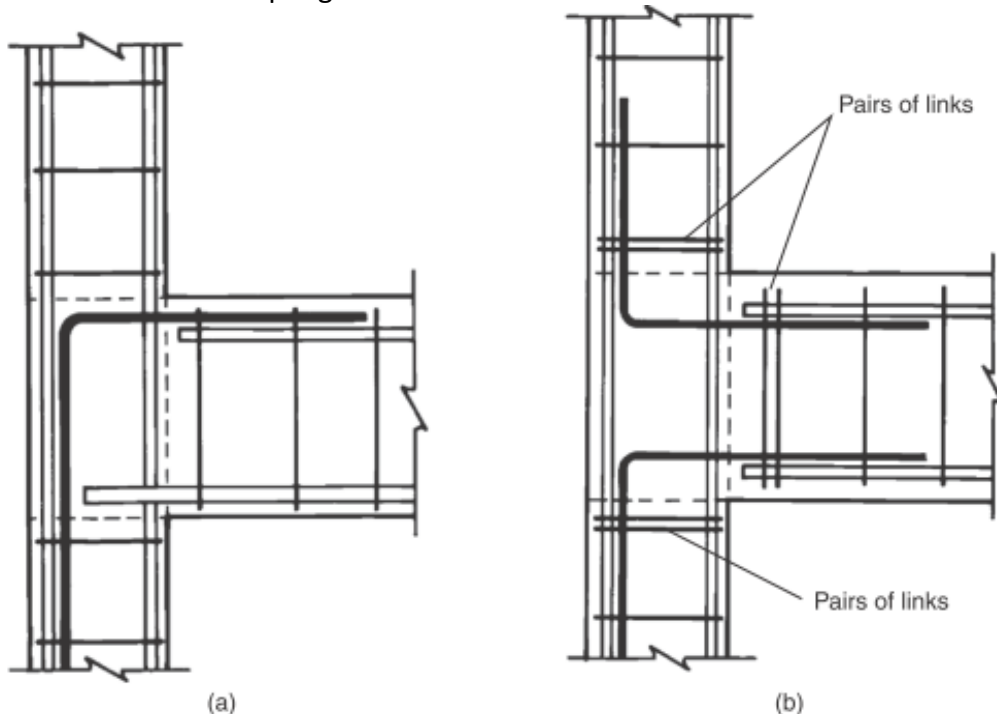


Figura 36. Tipologia comune di rinforzo per un nodo trave-pilastro (a). Sistema di rinforzo maggiorato(b). (9)

Per le connessioni colonna-trave di bordo tradizionali, le barre a "L" che collegano l'armatura superiore della trave con l'armatura esterna della colonna, devono essere accoppiate ad altri rinforzi, come una barra a "L" rivolta verso la parte superiore del pilastro e un infittimento delle staffe in prossimità del nodo. La barra a "L" rivolta verso l'alto rappresenta un ottimo elemento di rinforzo contro i blast load, ma può rappresentare un rischio per la sicurezza in fase di demolizione, in quanto non rappresenta un dettaglio in grado di sviluppare una adeguata duttilità nei riguardi dei carichi verticali. (2)

Le prescrizioni sopra riportate fanno riferimento al rinforzo in corrispondenza dei nodi, per quanto riguarda invece i singoli elementi strutturali, si tende a rinforzarli adottando un sistema di rivestimento e confinamento del calcestruzzo, realizzato

mediante “steel jacket” o uno strato di fibra di carbonio. Lo scopo è quello di confinare l’elemento, sia per acquisire una maggiore resistenza a taglio, sia per tenere insieme le macerie che si vengono a formare, permettendo così che si possano sopportare ancora i carichi verticali. (9)

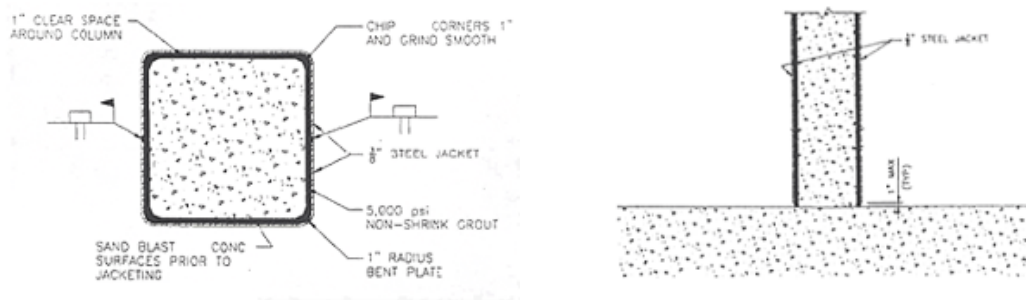


Figura 37. Sezione di una “steel racket” posta intorno ad una colonna in c.a. (9)

Rottura e spalling del cemento armato soggetto a blast load

L’impatto di un’onda contro una struttura, dovuta all’esplosione di un “high explosive” posto in stretto contatto o in prossimità ad essa, genera nei materiali un flusso di sforzi interni di compressione che produce un effetto distruttivo, noto come “brisance”.

Questo fenomeno può portare all’espulsione del copri ferro sulla faccia posteriore dell’elemento a causa di un eccesso di sforzo di trazione nelle armature. Si formano così piccoli frammenti di cemento, che si distaccano a partire dal punto di impatto sulla superficie dell’elemento, fino a coprire tutto il suo spessore in base alla forza impressa dall’esplosione.

Il disgregamento di metà della profondità dell’elemento è la soglia approssimata che ne determina il crollo. Le barre di armatura a taglio e a flessione aiutano ad attenuare il distacco di frammenti e a contenerli una volta che il processo si è verificato. I frammenti rilasciati possono rappresentare un notevole pericolo per le persone e per le attrezzature presenti, in quanto possono raggiungere velocità superiori a 60 m/s. L’espressione riportata di seguito fornisce un’ indicazione sullo spessore minimo (h) richiesto per una parete o una piastra per resistere allo spalling e allo sfondamento indotto dagli effetti di una esplosione (considerata sferica) che si verifica ad una distanza scalata $Z = R/W^{1/3}$, dove R è la distanza dall’ordigno espresso in peso (W) di TNT.

Se $\frac{h}{W^{1/3}} > 0,07 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-0,62}$ non si dovrebbero verificare danni.

Se $\frac{h}{W^{1/3}} > 0,03 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-0,62}$ l’elemento non dovrebbe crollare. (2)

Confronto della risposta tra cemento armato e acciaio



Figura 38. Boucher Street, Belfast. (2)

La struttura e il leggero rivestimento in acciaio hanno subito notevoli danni a seguito di un attentato bomba da parte dell'IRA.

La struttura di un edificio in cemento armato presenta una massa più grande rispetto a quella che avrebbe se fosse stata realizzata in acciaio. Per questo motivo il cemento armato è più resistente agli effetti di una grande esplosione in regime impulsivo. L'acciaio è invece più adatto a resistere a pressioni relativamente basse di natura quasi statica.

La natura massiccia del calcestruzzo armato implica elementi con sezioni tendenzialmente tozze, la cui resistenza ultima è ragionevolmente prevedibile. Al contrario per l'acciaio si hanno sezioni snelle, che possono andare incontro al fenomeno dell'instabilità locale e una conseguente resistenza ultima non prevedibile. Un elemento strutturale dopo essere stato perturbato da una forza, come quella generata da un'onda di blast, tende a tornare alla sua condizione di quiete e, a causa dell'energia accumulata durante la deformazione, a fornire un contraccolpo nella direzione opposta allo spostamento effettuato. Questo fenomeno è minimo nel caso del cemento armato, perché smorzato dai fenomeni fessurativi, mentre per l'acciaio può essere rilevante, soprattutto per carichi di breve durata, a causa della flessibilità degli elementi. Pertanto le strutture in acciaio devono essere progettate per supportare significative inversioni del carico.

Progetto di elementi in muratura per resistere ai blast load

Gli elementi murari vengono principalmente utilizzati per la costruzione di pareti, che anche se opportunamente progettate, possono offrire resistenza a pressioni relativamente basse.

Ci sono limitazioni sulla quantità e tipologia di rinforzi e armature che si possono utilizzare, con una conseguente capacità di deformazione limitata dovuta alla scarsa resistenza a trazione della malta, che manifesta fenomeni fessurativi già nella prima fase di risposta.

La resistenza di una parete in muratura rinforzata è affidata a una combinazione di barre di acciaio orizzontali e verticali accoppiate con una particolare tipologia di

mattoni, mentre per le murature tradizionali si fa riferimento solamente alla loro capacità di sviluppare un comportamento ad arco.

Per quanto riguarda le murature armate si seguono i principi indicati per il cemento armato, si definisce una funzione resistenza-deformazione elasto plastica ideale a partire dal modulo elastico dei blocchi di muratura e dalla resistenza dinamica dell'armatura. La massima resistenza dipende dalla distribuzione del carico applicato, dalla quantità e distribuzione dell'armatura e dal tipo di vincoli. La rotazione massima θ ammessa ai vincoli è pari a 1° , ma se si vuole riutilizzare il muro deve essere contenuta a $0,5^\circ$.

Le murature tradizionali offrono scarsa resistenza ai blast loading, tanto che la normativa americana ne vieta l'utilizzo nella realizzazione di nuove costruzioni per le quali si prescrive un determinato livello di protezione. Tuttavia potrebbe essere necessario studiare la risposta di una muratura esistente.

Nel caso in cui non sia previsto un vincolo nella parte superiore del muro la funzione di resistenza è derivata a partire dalla distribuzione degli sforzi di flessione fino alla resistenza a trazione della malta e dal momento riequilibrante generato dal peso del muro.

In una muratura tradizionale sollecitata si presuppone la formazione di una cerniera a circa due terzi dell'altezza, questo comportamento porta alla seguente curva di resistenza:

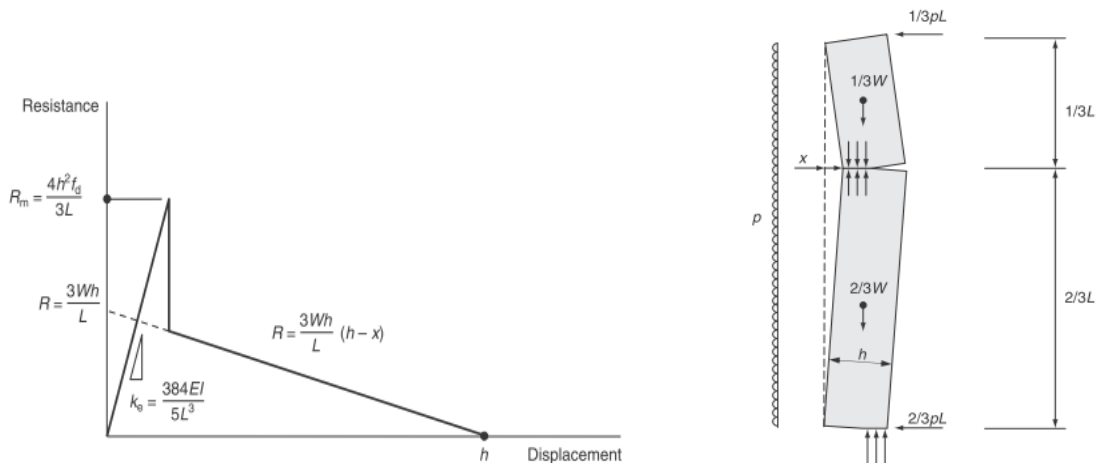


Figura 39. A sinistra: funzione di resistenza per una muratura. Figura 40. A destra: schema di risposta di una muratura vincolata alla base. (2)

Una muratura portata a rottura da una forte esplosione costituisce una notevole fonte di pericolo per gli utenti dell'edificio, in quanto il crollo è seguito dalla formazione di detriti che vengono proiettati come proiettili all'interno dell'ambiente. Per questo motivo, negli edifici esistenti, si trattano le pareti con un rivestimento polimerico a base di poliuretano, spruzzato similmente ad un intonaco sulla faccia interna. Questo materiale forma una membrana elastica che non impedisce la rottura del muro, ma grazie alle sue proprietà di resistenza ed elasticità è in grado di dissipare in parte l'energia dell'esplosione e, soprattutto, contenere i detriti evitando che vengano scagliati nell'ambiente.

Un altro sistema, che utilizza lo stesso principio del precedente, prevede la stesura di

un telo geotessile sulla faccia interna della muratura, fissato superiormente ed inferiormente in corrispondenza dei solai. (9)

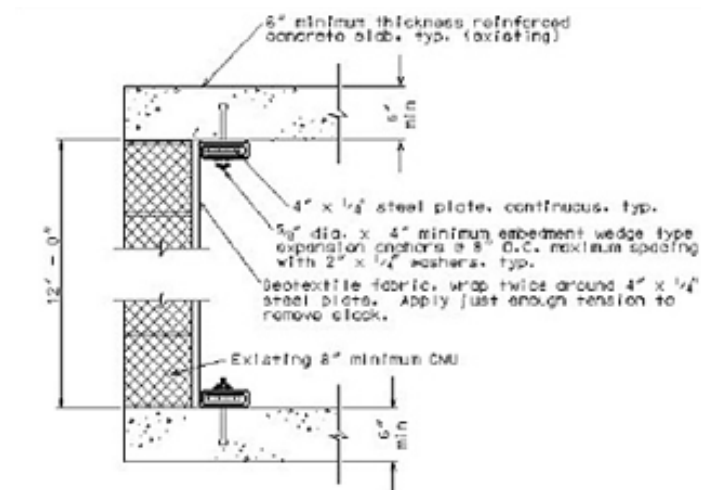
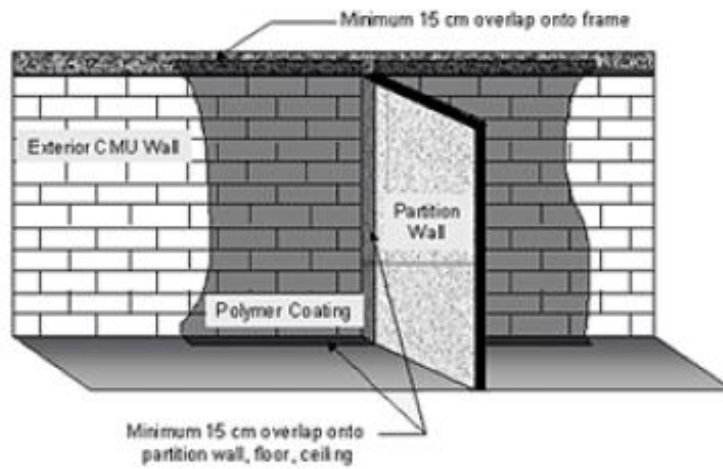


Figura 41. In alto: modalità di stesura del rivestimento polimerico. Figura 42. In basso: sistema di ancoraggio dei teli geotessili. (9)

4-Risposta degli edifici

Quando si progetta un edificio per resistere ai danni provocati dalle esplosioni è importante considerare non tanto il comportamento di una singola colonna, trave o finestra, ma la risposta del sistema strutturale nel suo insieme. Quando non è possibile progettare in modo sostenibile un elemento strutturale, dal punto di vista economico, è necessario studiare gli effetti globali causati da un danno localizzato. Per esempio, nel caso di collasso di un pilastro si valuta la possibilità di poter redistribuire le sollecitazioni gravanti su di esso sulle travi e sulle colonne adiacenti.

A tale proposito, la normativa inglese per gli edifici alti prevede che, a seguito della rimozione di ogni colonna o trave, l'edificio rimanga stabile e l'area di solaio a rischio di crollo sia pari al minore tra il 15% della superficie di piano e 70 m^2 . Inoltre il collasso non deve estendersi oltre i piani immediatamente adiacenti. (12)

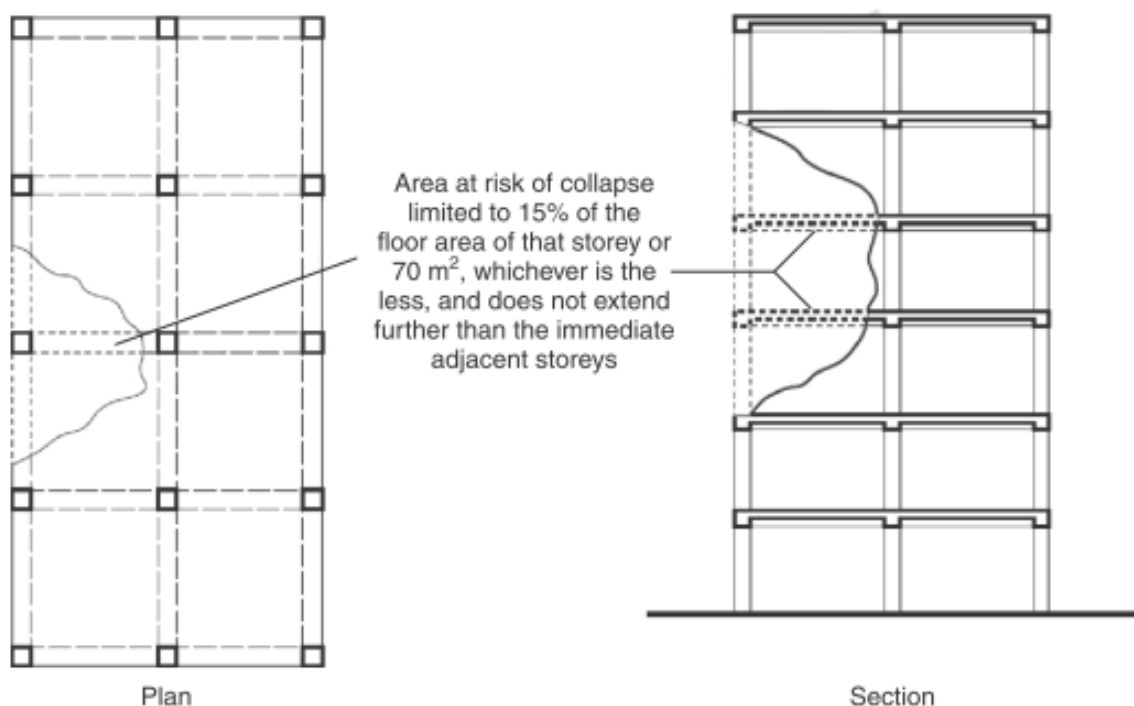


Figura 43. Schema del danno massimo consentito dalla normativa inglese per un edificio, al fine di prevenirne il collasso progressivo. (12)

Collasso sproporzionato – collasso progressivo

E' opportuno distinguere il collasso sproporzionato dal collasso progressivo. Il primo si manifesta in misura maggiore rispetto ad alcuni limiti prestabiliti che definiscono la soglia tollerabile di danno, definita dalle linee guida nazionali o dalla volontà del cliente in stretta relazione con la natura dell'evento scatenante.

Il collasso progressivo rappresenta una reazione a catena di rotture. A partire da un danno iniziale che ha interessato direttamente un porzione relativamente piccola della struttura, la rottura si propaga agli elementi vicini, che a loro volta determinano la rottura di altri elementi, con un effetto domino che può coinvolgere gran parte se non l'intera struttura.

Nello specifico, il collasso progressivo descrive la situazione in cui la struttura perde il sostegno di una o più colonne: i carichi gravitazionali vengono applicati alle travi di

connessione, che agiscono come load paths alternativi e trasferiscono i carichi ai pilastri loro adiacenti.

Se gli elementi che formano questo “nuovo” load path non sono in grado di supportare il carico aggiuntivo, il collasso si propaga, coinvolgendo con una reazione a catena l'intera struttura.

Nel caso invece in cui i load paths siano in grado di supportare carichi ulteriori, il collasso viene fermato e limitato agli elementi venuti a mancare.

In quest'ultimo caso entrano in gioco quattro tipi di meccanismi di resistenza:

- (a) catenaria, che si forma nelle travi e vede un'azione di trazione contrapposta rispetto al nodo su cui insisteva la colonna crollata;
- (b) capacità di deformazione a taglio;
- (c) azione di membrana nel solaio;
- (d) azione di Vierendeel, dovuta all'azione del momento flettente nelle connessioni trave-colonna.(2)

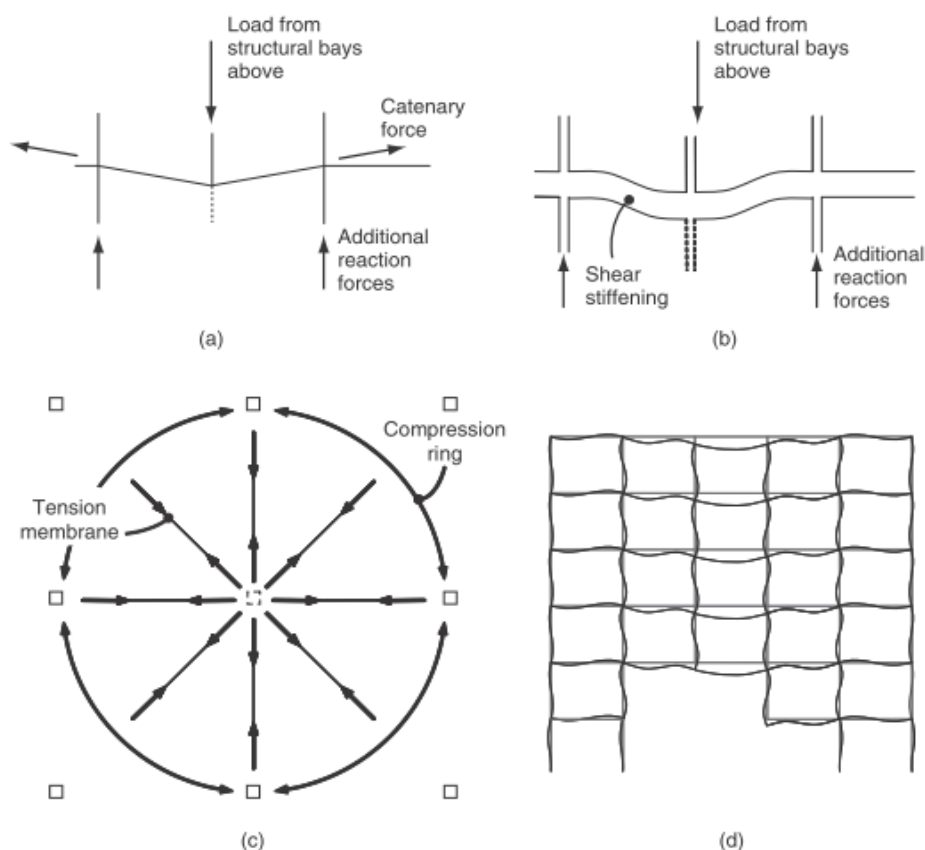


Figura 44. Schematizzazione dei possibili meccanismi di resistenza che si generano a seguito del crollo di una colonna. (2)

A causa della stretta dipendenza che lega il collasso sproporzionato alla natura dell'evento dannoso, il collasso progressivo non è necessariamente sproporzionato: nel caso di un fenomeno molto potente può essere accettabile anche la completa distruzione dell'edificio. L'obiettivo del progettista è quello di trovare il giusto compromesso tra livello di protezione, rischio preventivato e costi, in modo da evitare un danneggiamento sproporzionato rispetto alle prestazioni attese, piuttosto che

scongiurarlo completamente.

Si riportano di seguito una serie di aspetti, da considerare durante la progettazione, per contenere il rischio di collasso progressivo:

- **Ridondanza:** consiste nella duplicazione dei componenti critici di un sistema con l'intenzione di aumentarne l'affidabilità e la disponibilità, in particolare per garantirne la sicurezza. Nel caso di un edificio si indica una elevata iperstaticità dell'edificio, che rimane quindi in grado, anche in presenza di fallimenti locali, di trovare percorsi di carico alternativi, attraverso la redistribuzione degli stessi sui restanti elementi e per mezzo dell'equilibrio esterno garantito dall'iperstaticità anche in mancanza di alcuni elementi.
- **Utilizzo di elementi strutturali duttili e studio delle connessioni:** la capacità di manifestare una risposta duttile è fondamentale quando si cerca una redistribuzione dei carichi estrema, come quella incontrata durante il crollo di un elemento strutturale.
- **Capacità di sopportare inversioni di carico.**
- **Capacità di resistere a un collasso da taglio:** un elemento strutturale che collassa per taglio presenta un comportamento non duttile, che può portare a un collasso di tipo progressivo. (13)

Sicuramente i casi più noti di collasso progressivo si sono verificati presso il Murrah Building ad Oklahoma City e le Torri Gemelle.

Per quanto riguarda il primo i fatti risalgono al 19 aprile 1995 quando un camion carico di esplosivo parcheggiato di fronte all'edificio Murrah di Oklahoma City esplose provocandone il crollo parziale e seri danni alle costruzioni circostanti.

L'edificio, costituito da una struttura a telaio in cemento armato, era stato realizzato in accordo con la normativa americana per gli edifici ad uso ufficio ad Oklahoma City, che non prevedeva il soddisfacimento di alcun requisito di resistenza sismica o alle esplosioni e, per questo motivo si tratta di un collasso progressivo classificato come non sproporzionato: al momento del progetto non si attendeva che dovesse resistere a un evento di tale portata.

I danni maggiori sono stati riscontrati in corrispondenza dell'ala nord, dotata di 9 piani, che si affacciava sul luogo dell'esplosione.

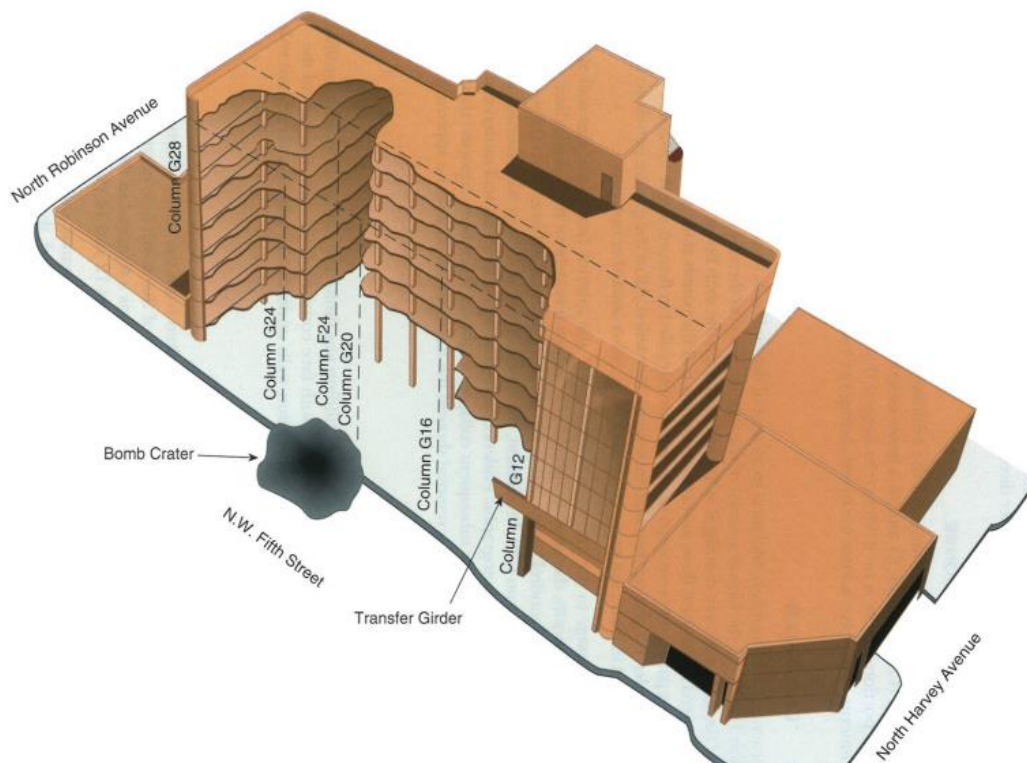


Figura 45. Spaccato dell'edificio per mettere in risalto i danni provocati dall'esplosione. Viene riportata la linea dei pilastri di bordo distrutti dall'ordigno. (14)

L'ordigno, la cui dimensione stimata risulta di 1,5 tonnellate di TNT equivalente, ha provocato la distruzione della colonna G20, che supportava la struttura dei piani soprastanti tra le colonne G16 e G24. Inoltre l'onda d'urto ha provocato nel G16 e G24 una forte sollecitazione di taglio, che, sommata ai carichi aggiuntivi sostenuti a seguito del collasso della G20, ha portato entrambe al cedimento.

Venuti a mancare tre pilastri adiacenti, la struttura orizzontale non è stata più in grado di reggere il peso dell'edificio, innescando così il processo di collasso progressivo, che ha coinvolto oltre la metà della superficie dello stabile.

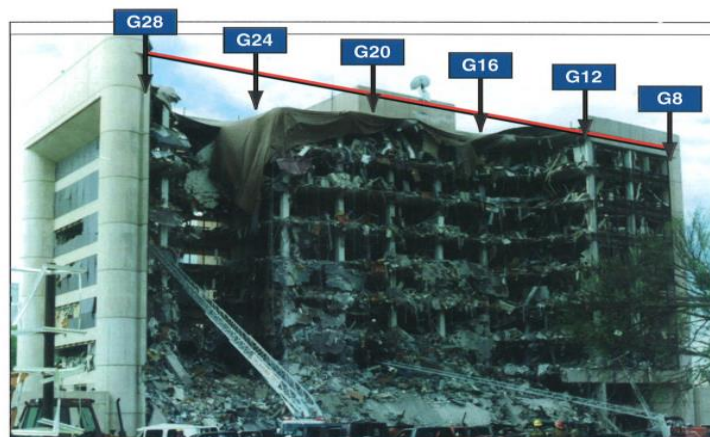


Figura 46. Facciata dell'edificio investita direttamente dall'esplosione. Si può notare la completa assenza dei pilastri 24,20 e 16 la cui distruzione ha provocato il collasso di gran parte dell'edificio. (16)

La colonna G20 è stata la prima a cedere perché era quella più vicina al centro dell'esplosione, a circa 4,5 metri di distanza, a testimonianza del fatto che non erano state adottate nessun tipo di misure per creare un perimetro di sicurezza e garantire un certo valore di stand off distance.

Tuttavia, a giudicare dai danni riscontrati anche negli edifici vicini, appare evidente che gli accorgimenti progettuali e i valori minimi di distanza di stand off suggeriti dalla normativa americana per edifici a rischio (compresi tra i 6 e 15 metri), non sarebbero sicuramente stati in grado di mettere in sicurezza lo stabile da una bomba di tale potenza, ma probabilmente avrebbero prevenuto l'innesco del collasso progressivo limitando i danni alla facciata adiacente l'esplosione . Uno studio sulle dinamiche dell'incidente ha inoltre concluso che il 90% delle vittime, considerando tutti gli edifici del complesso del Murrah Building, non sono attribuibili all'onda d'urto dell'esplosione, ma al cedimento strutturale e ai detriti creatisi a seguito della rottura delle murature e delle finestre, scagliati in aria come proiettili.

Questo fatto evidenzia l'importanza di adottare partizioni e componenti costruiti con materiali in grado di rompersi senza formare piccoli frammenti. (14)

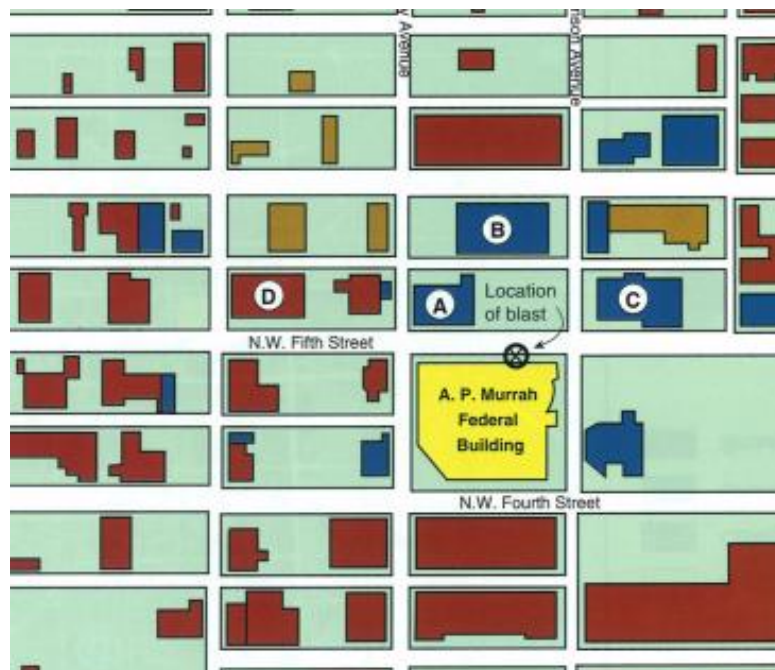


Figura 47. Pianta del complesso di edifici circostanti al Murrah Building. (16)

Le aree colorate in blu hanno riportato danni strutturali, i verdi crolli strutturali e i rossi rottura delle finestre. La potenza dell'ordigno è testimoniata dal fatto che si sono riscontrati crolli strutturali anche in edifici posti a 300-350 metri di distanza.

Le torri gemelle vennero rase al suolo la mattina dell'11 Settembre del 2001 in seguito all'impatto di due BOEING 767.

Nell'attentato persero la vita circa 3000 persone, di cui la grande maggioranza non per diretta conseguenza dell'impatto iniziale, ma per causa del collasso progressivo conseguente, che per entrambi gli edifici si verificò parecchio tempo dopo. (quasi un'ora per il WTC2 e circa un'ora e tre quarti per il WTC1).

Secondo il rapporto del FEMA, il collasso iniziò 56 minuti dopo l'impatto,

approssimativamente intorno all'80° piano per poi propagarsi rapidamente ai piani sottostanti con un meccanismo denominato a "pancake", fino alla completa distruzione dell'edificio.

Sebbene né al tempo della costruzione del WTC (1960) né attualmente sia richiesta dalle norme un'analisi specifica per la verifica della robustezza, le Torri Gemelle furono la prima

struttura non militare modellata per resistere a per carichi inusuali: nel progetto delle due torri era stata inclusa la verifica contro l'impatto accidentale di un BOEING 707, di dimensioni non molto inferiori a quelle del 767.

Tuttavia in fase di progetto non erano stati valutati gli effetti indiretti dell'impatto, come l'enorme calore sviluppato dalla combustione del carburante dei due aerei, che ha provocato il cedimento dei piani. (15)

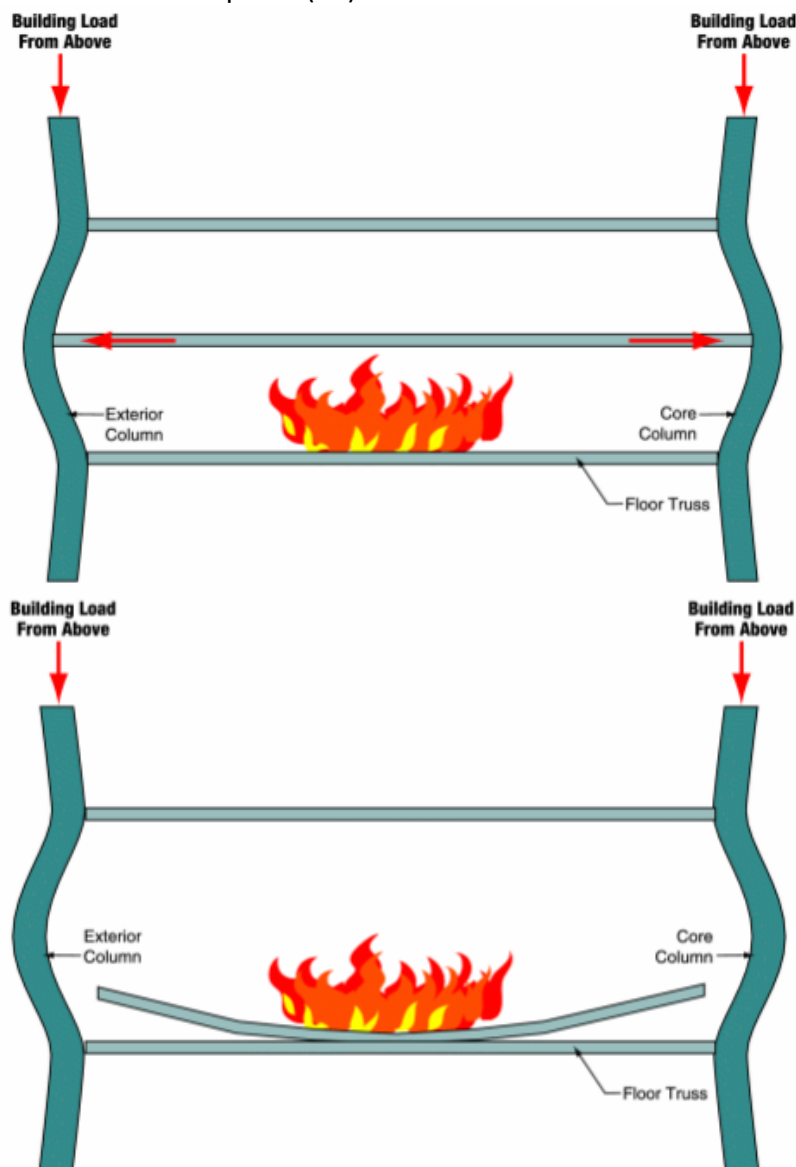


Figura 48. Schema di crollo. (14)

Il calore ha provocato la dilatazione delle travi di piano, che hanno così danneggiato i vincoli in corrispondenza delle colonne.

Introduzione dei requisiti di robustezza nelle linee guida nazionali

Le prime considerazioni a proposito di requisiti minimi di robustezza risalgono al 1970, anno in cui vi fu la revisione del “Building Regulations” inglese. Tale revisione nasce come provvedimento a seguito del collasso progressivo avvenuto in un angolo di un edificio a torre presso Ronan Point nel 1968, provocato da un’ esplosione dovuta a una fuga di gas al diciottesimo piano. I pannelli portanti prefabbricati, che costituivano le pareti, erano dotati di un particolare giunto che si è rivelato inefficiente nel trasferire i carichi ad altre porzioni della struttura.

La conseguenza è stata l’innescarsi di un meccanismo di collasso progressivo di tutti i piani sovrastanti. La struttura era dotata di scarsa ridondanza, essendo costituita da un nucleo centrale al quale vengono “appesi” i piani, secondo un tipico schema adottato specialmente negli edifici americani.

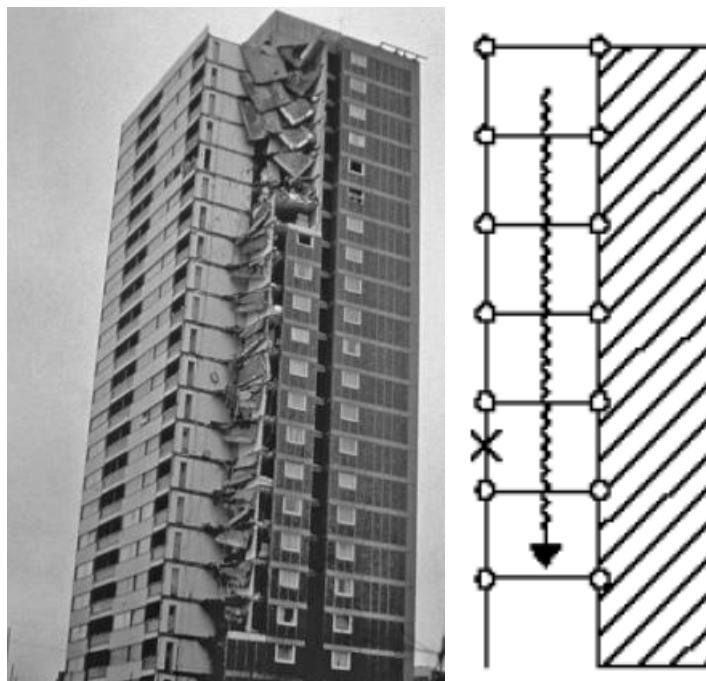


Figura 49. Ronan Point. (14)

Collasso progressivo di un angolo dell’edificio dovuto al cedimento della parete perimetrale prefabbricata.

La “code revision” non fa nessun riferimento ai carichi dovuti alle esplosioni, si limita a indicare un livello minimo di robustezza, che permetta alla struttura di sopperire alla perdita di uno o più elementi attraverso la redistribuzione dei carichi.

I benefici di questi tipi di provvedimenti si possono notare confrontando i danni provocati da due attacchi terroristici dell’IRA alla sede della “Chamber of Shipping” nel 1992 e alla “Kansalis House” a Londra nel 1993.

Il primo edificio è stato costruito nel ’67, prima dell’entrata in vigore della revisione del codice. A seguito dell’esplosione, si è riscontrato il cedimento dei solai, incapaci di redistribuire i carichi generati dal crollo di alcune colonne.



Figura 50. Chamber of Shipping, Londra, 10 aprile 1992. (2)

Al contrario la Kansalis House è stata costruita nel 1980 in accordo con le nuove disposizioni.

A seguito dell'attentato, i danni maggiori sono stati riscontrati in corrispondenza di uno degli angoli dell'edificio, dove un pilastro ha ceduto lungo tre degli otto piani.

Tuttavia lo stabile disponeva di una ridondanza tale da poter redistribuire i carichi e prevenire un crollo più grande. (2)



Figura 51. Kansalis House, Londra, 24 aprile 1993. (2)

Tollerabilità del rischio di collasso sproporzionato

Per stabilire il livello di robustezza verso i blast load atteso da un edificio è necessario definire una scala di tollerabilità del rischio, frutto di uno studio che prende in considerazione i seguenti fattori:

- Popolazione: intesa come densità e numero di utenti, e di conseguenza il numero di infortuni che si prevedono a seguito del crollo di una determinata area.
- Profilo degli utenti: natura sociale, età, abilità motorie.
- Tempo previsto di evacuazione.
- Destinazione d'uso: esprime l'importanza di provvedere un certo grado di robustezza al collasso, si possono individuare le seguenti categorie:
 - attività speciali, edifici vulnerabili e sedi di attività critiche (laboratori chimici o depositi di sostanze nocive ed esplosive);
 - infrastrutture strategiche nazionali (linee di comunicazione, stazioni e porti);
 - edifici pubblici (scuole ed ospedali);
 - Edifici commerciali;
 - Edifici residenziali.
- Aspettative della società: rappresenta l'idea della popolazione che gli edifici proteggano i loro occupanti dai pericoli.
- Caratteristiche della costruzione: numero di piani, estensione in pianta, materiali utilizzati, codici e standard di progetto seguiti. Questi elementi determinano il tipo e l'estensione del collasso a fronte di un danno.
- Misure di protezione da possibili minacce: si citano ad esempio i provvedimenti attuati per creare un certo valore di distanza di stand off attorno all'edificio o l'utilizzo di elementi vetrati in grado di resistere alle esplosioni.
- Costruzioni esistenti: si considera l'età di progetto, i relativi standard progettuali applicati, e la vita utile residua dell'edificio.
- Committenza. (2)

A seguito dell'analisi di questi fattori, la normativa inglese propone una serie di categorie di edifici:

Classe	Tipologia di edificio e utenza
1	Case con meno di 4 piani Edifici agricoli Edifici poco frequentati, distanti almeno 1,5 volte la loro altezza da aree ad alta densità di popolazione
2A	Hotel con meno di 5 piani Edifici residenziali con meno di 4 piani Edifici adibiti ad uffici con meno di 4 piani Edifici industriali con meno di 3 piani Negozi articolati su meno di 3 piani e area di piano minore di 2000 mq Scuole articolate su un singolo piano Tutti gli edifici con meno di due piani in cui è ammesso il pubblico, con area di piano inferiore a 2000 mq
2B	Hotel e edifici residenziali fino a 15 piani Scuole fino a 15 piani Negozi articolati su meno di 15 piani Edifici adibiti ad uffici con meno di 15 piani Tutti gli edifici con meno di due piani in cui è ammesso il pubblico, con area di piano inferiore a 5000 mq Parcheggi articolati su meno di 6 piani
3	Edifici che superano i limiti della classe 2B Edifici che ospitano sostanze o processi pericolosi Strutture che ospitano più di 5000 persone

Riporto della normativa inglese

Per gli edifici della categoria 1 non viene prescritto alcun livello minimo di resistenza, mentre a partire dalla 2° si inizia a richiedere un livello minimo di continuità e dettaglio dei vincoli per gli elementi strutturali perimetrali.

Per le classi 2B e 3 si richiede che non si verifichi un collasso sproporzionato: a seguito della rimozione di un singolo elemento portante non si deve verificare il crollo del minore tra il 15% dell'area di piano e una porzione di piano di 70 mq, inoltre il collasso non si deve estendere ai piani adiacenti.

Qualora in sede di progetto non sia possibile garantire la stabilità strutturale a seguito della rimozione di una colonna, questa viene designata come elemento chiave e modellata per sostenere un carico accidentale di 34 kPa. (12)

Classes	Building type and occupancy
1	Houses not exceeding 4 storeys Agricultural buildings Buildings into which people rarely go, provided no part of the building is closer to another building, or area where people do go, than a distance of 1.5 times the building height
2A	5 storey single occupancy houses Hotels not exceeding 4 storeys Flats, apartments and other residential buildings not exceeding 4 storeys Offices not exceeding 4 storeys Industrial buildings not exceeding 3 storeys Retailing premises not exceeding 3 storeys of less than 2000m ² floor area in each storey Single-storey educational buildings All buildings not exceeding 2 storeys to which members of the public are admitted and which contain floor areas not exceeding 2000m ² at each storey
2B	Hotels, flats, apartments and other residential buildings greater than 4 storeys but not exceeding 15 storeys Educational buildings greater than 1 storey but not exceeding 15 storeys Retailing premises greater than 3 storeys but not exceeding 15 storeys Hospitals not exceeding 3 storeys Offices greater than 4 storeys but not exceeding 15 storeys All buildings to which members of the public are admitted which contain floor areas exceeding 2000m ² but less than 5000m ² at each storey Car parking not exceeding 6 storeys
3	All buildings defined above as Class 2A and 2B that exceed the limits on area and/or number of storeys Grandstands accommodating more than 5000 spectators Buildings containing hazardous substances and/or processes
Notes:	
1. For buildings intended for more than one type of use the Class should be that pertaining to the most onerous type.	
2. In determining the number of storeys in a building, basement storeys may be excluded provided such basement storeys fulfil the robustness requirements of Class 2B buildings.	

Estratto dalla normativa inglese.

5-Progetto degli elementi vetrati

I primi studi sulla resistenza del vetro ai blast loads risalgono alla fine degli anni '70, figli della necessità da parte del governo inglese, di fornire un adeguato livello di protezione agli edifici a seguito degli attacchi terroristici degli indipendentisti irlandesi. La rottura di una vetrata a seguito di un'esplosione può causare notevoli danni alle persone e alle attrezzature circostanti: le lastre di vetro monolitiche sono elementi fragili che cedono improvvisamente disperdendosi in innumerevoli frammenti. Il rischio collegato alla frammentazione può essere mitigato con l'utilizzo di vetri stratificati che permettono di ottenere un comportamento duttile dell'elemento, in grado di fornire, a parità di spessore, una maggiore resistenza rispetto a un vetro monolitico.

La priorità del progettista nella scelta del tipo di vetro da utilizzare deve riguardare la sicurezza degli occupanti dell'edificio e di conseguenza deve valutare la possibile formazione di frammenti di vetro.

Una progettazione adeguata delle chiusure trasparenti può inoltre attenuare o addirittura bloccare la pressione generata dall'esplosione che può entrare all'interno dell'edificio. Queste infatti possono rimanere intatte o comunque rompersi dopo aver manifestato una duttilità tale da poter attenuare la forza dell'onda di blast. Quando l'onda d'urto riesce sfondare le finestre e a penetrare all'interno dell'edificio le fonti di pericolo principali non derivano soltanto dalle schegge di vetro, ma soprattutto da veri e propri proiettili dovuti alla rottura degli arredi e degli infissi interni.

A partire dai risultati dei test svolti in Inghilterra negli anni '70 e '80 sono state classificate le capacità di protezione di vari tipi di vetri monolitici (float e temperato), a partire dalla rilevazione della distanza cui vengono proiettati i frammenti. I rilevamenti sono stati eseguiti in una cella tipo di tre metri di profondità e con un'apertura di 60 cm. (2)

Vengono individuate le seguenti categorie:

- rottura sicura: i frammenti cadono sul pavimento a meno di un metro dalla finestra;
- pericolo minimo: i frammenti colpiscono la parete opposta alla finestra ad una altezza minore di mezzo metro;
- pericolo elevato: i frammenti colpiscono la parete opposta alla finestra ad una altezza superiore a mezzo metro. (21)

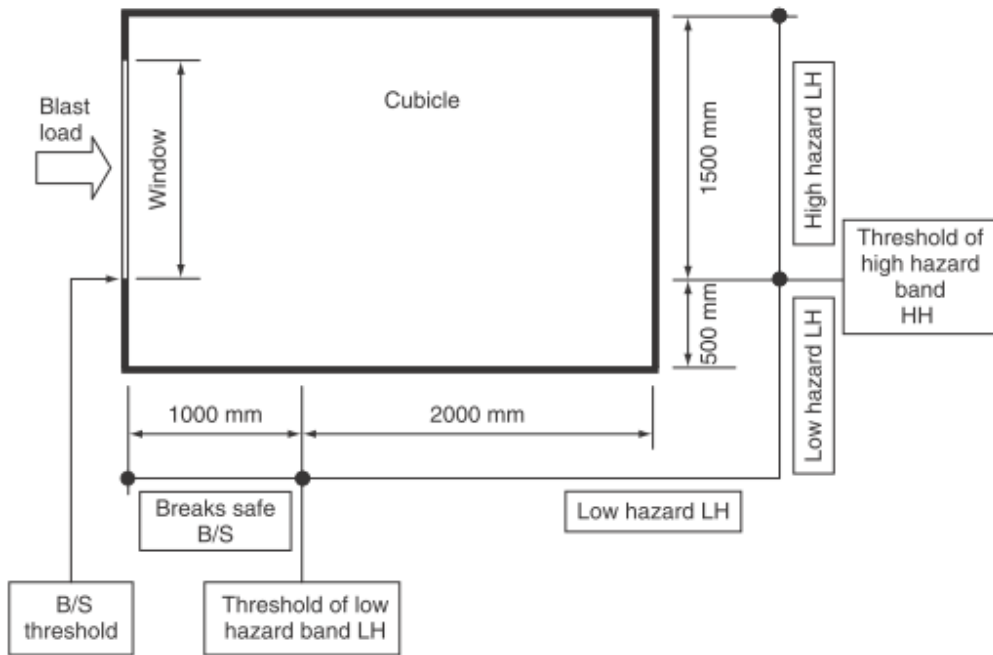


Figura 52. Classificazione dei danni secondo la normativa inglese. (21)

Le velocità stimate con cui i frammenti raggiungono le varie zone della cella di prova sono comprese tra: 2 m/s (low hazard) e 9 m/s (high hazard).

L'applicazione di questa classificazione non trova riscontro con il comportamento dei vetri stratificati, in quanto sono soggetti a un meccanismo di rottura differente: non vengono proiettati frammenti di materiale, al massimo si può diffondere nell'ambiente la polvere di vetro, dannosa per gli occhi. L'applicazione di questo tipo di tecnologia individua quindi come situazione di pericolo il momento in cui iniziano a penetrare all'interno dell'edificio le pressioni generate dall'esplosione, condizione subordinata al distacco della lastra di vetro dalla sede del telaio.

Osservando i danni riscontrati all'interno di diversi edifici, a seguito di esplosioni avvenute al loro esterno, è possibile riconoscere differenti performance delle facciate:



- 1) Distruzione completa dell'interno dell'edificio, la struttura rimane intatta.



2) Violenta proiezione all'interno dell'ambiente dei frammenti di vetro delle finestre e distruzione dovuta alla penetrazione della pressione generata dall'esplosione.



3) In questo caso si notano minori danni grazie alla protezione fornita dall'uso di vetri laminati, che producono una proiezione di schegge minima, anche se divelti dal loro infisso.



4) L'interno dell'edificio è completamente protetto dall'utilizzo di vetri stratificati che non raggiungono il loro limite di rottura e rimangono ancorati al loro telaio.

Figura 53. Rottura di diverse tipologie di vetri. (2)

Tipi di vetro e comportamento contro i blast loads

- Vetri monolitici:
 - Vetro float

Il vetro float è il materiale utilizzato più comunemente per la realizzazione delle vetrate. Presenta un comportamento piuttosto fragile dovuto alla presenza di irregolarità microscopiche distribuite sulla superficie che provocano una notevole variabilità della resistenza offerta e uno sviluppo casuale delle cricche che caratterizzano il processo di rottura. Dopo la sua produzione i difetti emergono rapidamente, a seguito delle reazioni chimiche del vetro venuto a contatto con gli agenti atmosferici. Quando si infrange si disgrega in innumerevoli frammenti irregolari, che costituiscono un serio pericolo per gli occupanti di un edificio.

- Vetro temprato

Viene ottenuto riscaldando il vetro float fino allo stato plastico, per poi farlo raffreddare con un processo controllato. Questo processo raffredda gli strati superficiali, causandone l'indurimento, mentre la parte interna rimane calda più a lungo. Il successivo raffreddamento della parte centrale produce uno sforzo di compressione sulla superficie, bilanciato da tensioni distensive nella parte interna. Il vetro temprato è circa sei volte più resistente del vetro float, questo perché i difetti superficiali vengono mantenuti "chiusi" dalle tensioni meccaniche compressive, mentre la parte interna rimane più libera da difetti che possono dare inizio alle crepe.

Quando un vetro temprato si rompe produce piccoli frammenti a forma di cubo con i bordi piuttosto smussati, risultando un serio pericolo per le persone prossime all'elemento, per via dell'altissima velocità con i quali vengono proiettati. Per questo motivo non se ne consiglia l'uso nel caso sia richiesto un certo grado di protezione verso i blast load. Tuttavia i frammenti risultano meno pericolosi rispetto a quelli del vetro float, più grandi e soprattutto accuminati e taglienti.



Figura 54. Rottura vetro monolitico. (2)



Figura 55. Rottura vetro temprato.(2)

- Vetro semi temperato

Questo tipo di vetro si ottiene con un procedimento simile a quello per il vetro temperato, ma in questo caso il float glass viene riscaldato a una temperatura minore. Di conseguenza è in grado di sviluppare una resistenza inferiore e a rottura produce dei frammenti taglienti simili al float glass, ma più grossi e quindi meno numerosi.

- Vetri stratificati

Il vetro stratificato è costituito dalla sovrapposizione di strati di vetro, interposti da elementi di separazione, tipicamente in polivinilbutirrale (PVB), un materiale plastico molto duttile e dotato di notevole resistenza a trazione. Quando l'elemento arriva rottura il PVB impedisce la formazione di frammenti di vetro trattenendoli sulla sua superficie, inoltre costituisce una membrana molto duttile in grado di sopportare notevoli sollecitazioni.

La rottura della finestra si può verificare nel caso in cui i frammenti di vetro lacerano il PVB o se il pannello fuoriesce dalla sede del telaio, risulta perciò evidente l'importanza dei sistemi di fissaggio del vetro con l'intelaiatura.

Il metodo più semplice per aumentare la resistenza del nodo vetro-telaio consiste nell'applicare lungo tutto il perimetro di bordo

una serie di viti di fissaggio.

Se si vogliono invece ottenere prestazioni

ottimali è necessario un dimensionamento specifico del telaio per resistere alla sollecitazione impressa dal blast load e provvedere all'ancoraggio del vetro mediante l'utilizzo di silicone sigillante strutturale.

I vantaggi del vetro stratificato rispetto al float glass o al vetro temperato sono:

- il fortissimo legame tra vetro e PVB, che si mantiene anche dopo la rottura degli strati di vetro;
- la grande capacità del pannello di deformarsi dopo che il vetro si è rotto;
- un meccanismo di rottura duttile.

In alcune applicazioni particolari, come i cupolini degli aerei, nello strato intermedio si utilizza il poliuretano che, a differenza del PVB rimane duttile anche a basse temperature e rigido alle alte. Tuttavia negli edifici non è molto diffuso, in quanto è più costoso del PVB. (18)



Figura 56. Rottura vetro stratificato. (18)

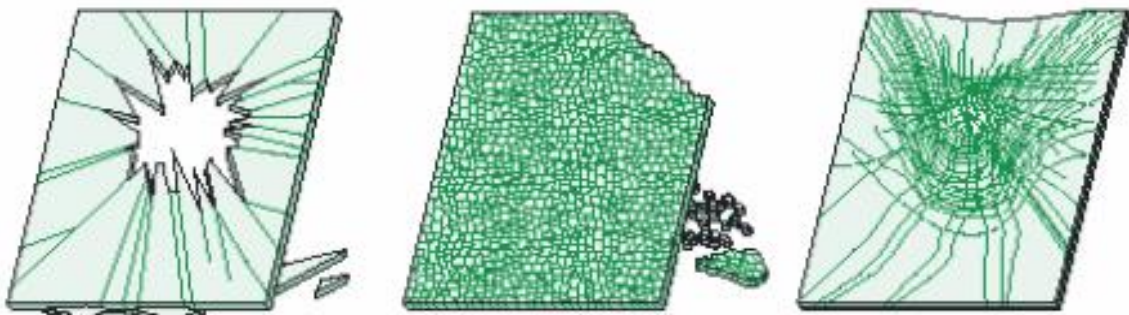


Figura 57. Confronto tra modalità di rottura di vetri float, temperati e stratificati. (17)

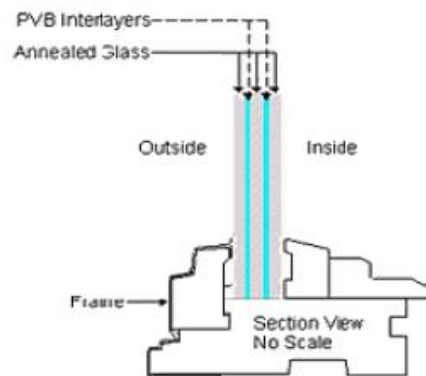


Figura 58. Sezione di una chiusura realizzata con un vetro stratificato. (17)



Figura 59. Effetto di un'esplosione.

Dalla foto emergono le prestazioni offerte da diverse tipologie di vetro: stratificato al piano terra, float al primo e terzo, temperato al secondo. Per ottenere un adeguato livello di protezione, al piano terra è stato adottato un pannello dello spessore di 29mm. La scelta di utilizzare un vetro stratificato al piano terra è figlia del fatto che i piani inferiori sono i più vulnerabili, e, a tal proposito, non si capisce la scelta di un vetro float al primo piano. (2)

- Vetri rivestiti con fogli di Policarbonato

Il policarbonato è una plastica rigida molto resistente, che può essere utilizzato come materiale per realizzare vetrate e, combinato con strati di vetro, viene impiegato per formare elementi anti proiettile.

Non si frantuma come il vetro, in quanto, se sottoposto a una sollecitazione, si flette in modo elastico e tende a uscire dalla sede del telaio rimanendo in un unico blocco.

La sua eccezionale resistenza e il suo comportamento elastico rendono molto problematica la realizzazione dei sistemi di fissaggio al telaio, fondamentali per poter permettere al policarbonato di esprimere tutte le sue qualità, dal momento in cui risulta la sezione più debole.

Tipologie di rinforzi

Le pellicole adesive anti frantumazione sono realizzate in poliestere e vengono applicate sulla faccia interna della vetrata in modo da evitare lo spargimento di frammenti nel caso il vetro dovesse essere scardinato dalla sua intelaiatura. Si applica alla parte visibile del vetro, non è prevista la sua presenza all'interno del telaio, perciò non ha il compito di prevenire le fratture sull'interfaccia telaio - vetro.

Alcuni produttori di pellicole hanno sviluppato alcuni sistemi di ancoraggio dell'adesivo al telaio per provare ad avvicinarsi alle prestazioni del vetro stratificato.

Ancorando lo sticker al telaio si ottiene un comportamento a membrana che ne garantisce una maggiore resistenza, anche se l'adesivo non dispone di una duttilità elevata come il PVB. Questo aspetto porta il telaio a dover sopportare elevate sollecitazioni divenendo l'elemento critico della vetrata. Per questo motivo le pellicole ancorate non vengono utilizzate in modo diffuso, preferendogli i vetri stratificati.

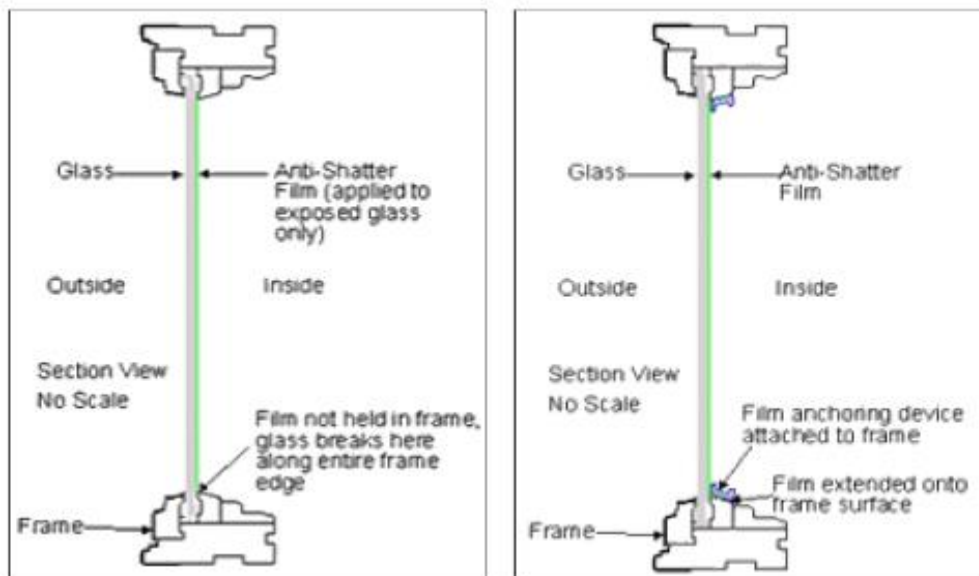


Figura 60. Diverse applicazioni delle pellicole adesive: (17)
a sinistra semplicemente incollata, a destra ancorata al telaio.

I tendaggi anti esplosione sono realizzati con tessuti ad alta resistenza, generalmente fibra di polietilene. Le tende vengono appese lungo il bordo superiore e dotate di una zavorra su quello inferiore. Ovviamente per poter essere efficaci devono essere sempre in posizione chiusa.

Il loro compito è quello di “catturare” e smorzare la traiettoria delle schegge e detriti generati dall’esplosione che tendono ad entrare nell’edificio dalle finestre. Questo tipo di soluzione non viene utilizzata in modo diffuso per via dei costi elevati, l’impatto estetico, la restrizione della visibilità e l’oscuramento verso la luce naturale. Un ulteriore sistema di protezione consiste nel posizionare al centro della sede interna della finestra, in prossimità del vetro, un sistema di sbarre metalliche o cavi d’acciaio tesi.

La loro funzione è confinare la deformazione del vetro ed evitare che venga scardinato dal telaio. Questa è una soluzione adottata nel caso di vetri stratificati, tipologia che manifesta le maggiori deformazioni.

Il livello di protezione offerto dai tendaggi e dalle pellicole adesive è stato testato in innumerevoli esperimenti e attacchi terroristici, ottenendo buoni risultati, che tuttavia si rivelano nettamente inferiori rispetto alle prestazioni offerte dai vetri stratificati.

L’ utilizzo di questi sistemi può costituire una soluzione di ripiego negli edifici esistenti, in cui sarebbe troppo oneroso la sostituzione delle vetrate con elementi stratificati.

(17)

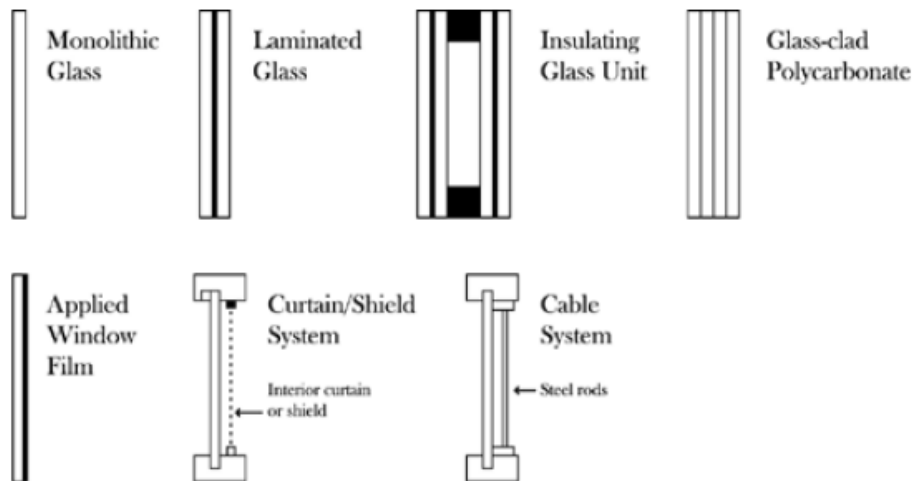


Figura 61: Diverse tipologie di vetro e sistemi di rinforzo. (17)

Nell’ordine: vetro singolo monolitico, vetro stratificato, vetrocamera, vetro accoppiato con rivestimento in polycarbonato, vetro monolitico con pellicola in poliestere, tende protettive, cavi.

Tipologie di telaio

La scelta del tipo di vetro deve essere seguita dall’impiego di un telaio con caratteristiche adeguate, in quanto le prestazioni di un pannello sono strettamente dipendenti dal suo sistema di supporto. Il telaio dovrebbe permettere al vetro di sviluppare tutta la sua resistenza senza subire cedimenti. Vi sono due famiglie di telai, quella in cui il vetro è supportato su tutti e quattro i lati (two way spanning system) e quella in cui è sorretto solamente su due bordi paralleli, generalmente la parte superiore e inferiore (one way spanning system). Il primo è il sistema che permette al vetro di sviluppare una maggiore resistenza, anche dopo la rottura, in quanto viene supportato su tutti e quattro i lati. Il “one way system” presenta invece prestazioni inferiori e, in caso di rottura, può generare un pericolo maggiore, in quanto è più probabile che si distacchino frammenti di vetro.

Per limitare questo fenomeno è necessario adottare un adeguato sistema di fissaggio del vetro sulla porzione superiore del telaio.

Il sistema di ritegno del vetro può essere realizzato mediante silicone strutturale (wet glazing) o guarnizioni elastomeriche a secco. Il silicone strutturale ha proprietà di ritenuta maggiori rispetto alle guarnizioni, in quanto crea maggiore continuità tra vetro e telaio permettendo di trasferire le sollecitazioni tra i due elementi in modo da far sviluppare al pannello tutta la sua resistenza. Di contro, invece, la capacità di ritegno delle guarnizioni fa affidamento alla sola forza di attrito che si istaura col vetro, andando, se sollecitate, verso il rischio di “pop out”.

Tuttavia se si guarda ad un aspetto puramente economico, a causa dell’elevato costo del silicone, è preferibile l’uso delle guarnizioni con un conseguente minor livello di protezione.

E’ opportuno riportare alcune riflessioni per il caso specifico delle curtain walls, che risultano un sistema in grado di fornire al vetro un notevole rendimento sotto blast load.

Questo per via della struttura di sostegno della facciata, generalmente realizzata con montanti e traversi in alluminio, che, grazie al loro comportamento elastico, permettono di dissipare gran parte delle sollecitazioni gravanti sul vetro.

Gli elementi che costituiscono il telaio dovrebbero essere progettati per estendersi da piano a piano, senza dover caricare lateralmente le colonne in prossimità degli interpiani, sottoponendole a un tipo di carico per le quali non sono state progettate.

Questo accorgimento può prevenire il crollo di un pilastro soggetto a blast load, in quanto dovrebbe sopportare un carico molto elevato, riconducibile alla forza trasmessa dall’onda incidente sulla superficie della vetrata e trasmessagli attraverso gli ancoraggi del telaio.

E’ possibile utilizzare pannelli privi di un sistema di supporto a telaio, che vengono sorretti tramite appositi bulloni inseriti in dei fori posti in prossimità dei bordi del vetro.

I bulloni a loro volta trasmettono i carichi gravanti sul pannello a una struttura secondaria a scheletro. Questa tipologia di sostegno prevede una concentrazione di sforzi notevoli in prossimità dei fori presenti sui vetri, di conseguenza si predilige l’utilizzo dei vetri temperati rispetto a quelli stratificati. Questo perché i vetri stratificati presentano una maggiore duttilità e tendono a deformarsi in prossimità dei fori, con un conseguente rischio di pull out dalla sede del sostegno che preclude la possibilità di poter sviluppare a pieno tutta la duttilità del pannello.

La resistenza offerta da questi sistemi, detti “bolt fixed”, a parità di vetro, è inferiore a quella di un sistema a telaio, tuttavia si possono raggiungere parametri soddisfacenti utilizzando spessori maggiori, che inevitabilmente portano a esborsi economici più onerosi.(20)

6-Protezione e prevenzione da attacchi eseguiti con veicoli bomba

Da un punto di vista statistico, la maggior parte degli attacchi terroristici degli ultimi anni presentano modalità d'azione simili: l'utilizzo di un mezzo di trasporto, come auto, camion, persone e, caso estremo, aerei, per cercare di portare l'ordigno esplosivo il più vicino possibile al bersaglio.

Tenendo da parte il caso degli aerei, per cui le possibili contromisure non risultano adottabili da edifici per uso civile, ci concentriamo sui sistemi di difesa da opporre a mezzi terrestri.

Alla luce del fatto che i due elementi principali caratterizzanti la potenza del blast load sono la quantità di esplosivo e la distanza a cui viene posizionato rispetto al bersaglio, la forma di difesa più semplice ed ovvia consiste nel creare intorno all'edificio una zona, nota come stand off distance, in cui le fonti di minaccia previste non possano entrare, in modo da tenerle il più lontano possibile dal bersaglio.

A tale proposito, la stand off distance si definisce come la distanza che intercorre tra un bene e una sua potenziale minaccia. Come principio generale si può assumere l'idea di massimizzare questo spazio, in quanto dove non è possibile è necessario intervenire per rinforzare i componenti dell'edificio, andando incontro a spese ingenti e a soluzioni non sempre funzionali dal punto di vista architettonico.

Il primo elemento da valutare, per poter creare una stand off distance, è la keep out zone, una distanza minima garantita tra l'obiettivo e la possibile minaccia, realizzata mediante la creazione di un perimetro difensivo con l'impiego di apposite barriere anti sfondamento.

Per massimizzare la "stand off" si tende a estendere la "keep out" al di fuori dell'area di pertinenza dell'edificio da proteggere. Un esempio di questa tendenza è riscontrabile nei contesti urbani, dove si hanno a disposizione spazi limitati. Un espediente per ovviare a questa forte limitazione consiste dunque nell'estendere la keep out zone per esempio installando dissuasori lungo la linea del marciapiede, vietare la sosta ai bordi della carreggiata oppure, in casi estremi, chiudere al traffico le strade intorno all'edificio.

Un'altra soluzione potrebbe riguardare lo sviluppo volumetrico dello stabile: i piani alti, possono essere disposti in una posizione arretrata rispetto a quelli inferiori.

Un secondo elemento da considerare è rappresentato dalla "clear zone", un'area adiacente all'edificio libera da ostruzioni visive, in modo da poter tenere sotto controllo la linea di delimitazione dell'area. (31)

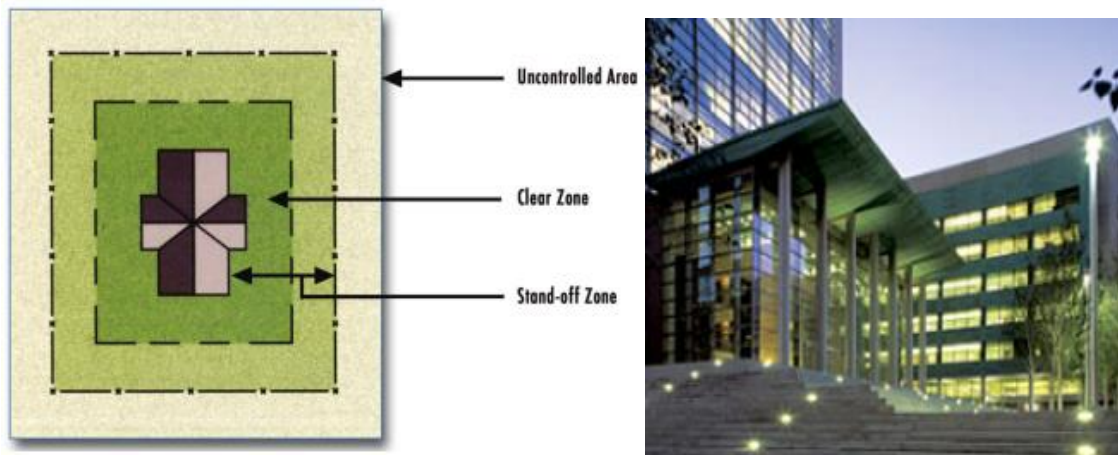


Figura 65. A destra: disegno proposto dalla U.S. air force design guide per schematizzare il concetto di stand off zone.(3) Figura 66. A sinistra: U.S. Courthouse, Seattle.

L'atrio dell'edificio è sporgente rispetto alla volumetria principale.(29) Questa caratteristica, in collaborazione con la scalinata circostante al palazzo, contribuisce a creare la stand off zone.

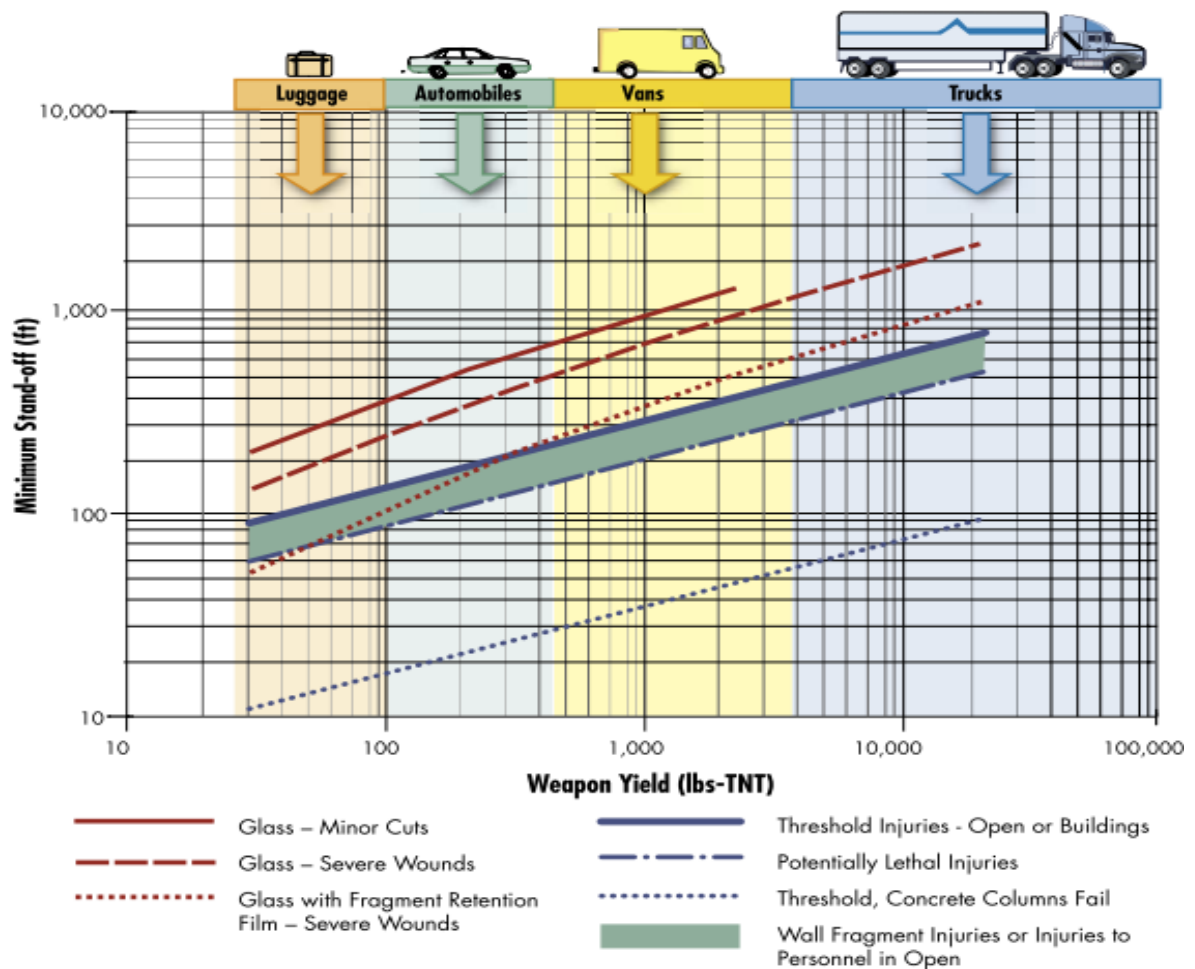


Figura 67. Grafico realizzato dall'U.S. air force per fornire una linea guida sulle stand off distance da adottare in base alla minaccia dalla quale si intende difendere un edificio.(3)

Diverse tipologie di minacce

Vi sono cinque modalità di azione ricorrenti negli attentati eseguiti mediante auto bomba, sicuramente gli effetti più dannosi vengono raggiunti se si tratta di attacchi suicidi, in quanto l'attentatore può manovrare l'arma fino all'ultimo istante.

- Veicolo parcheggiato: la minaccia potrebbe derivare da un mezzo che sosta in prossimità del bersaglio, come nel caso del Murrah Building. Questa tipologia di attacco può essere efficace nel caso in cui vi siano stand-off distance minime o sia possibile entrare all'interno dell'edificio, ad esempio sfruttando un parcheggio sotterraneo.
- Invasione: si verifica quando un veicolo ostile supera la linea di barriera senza il bisogno di forzarla. Si può verificare nel caso in cui siano presenti tipologie di sbarramenti fissi in grado di permettere il passaggio di persone a piedi: di conseguenza sono posizionati ad una certa distanza l'uno dall'altro e possono permettere il passaggio di piccoli mezzi come moto, biciclette e chiaramente persone.

C'è anche la possibilità che il veicolo possa introdursi all'interno delle barriere stando a distanza ravvicinata di un mezzo a cui è permesso l'accesso, e sfruttando così la temporanea apertura dei gate.

L'unica difesa da questo tipo di azioni consiste nell'impiego di una doppia linea di sbarramento, con la seconda che si apre a seguito della chiusura della prima.

- Attacco diretto: viene usato l'autoveicolo come ariete per forzare le barriere. Di conseguenza la barriera viene dimensionata a partire dalla massa, dalla struttura, dalle prestazioni e dalla manovrabilità del mezzo che si vuole ostacolare. Possiamo citare come esempio di questa tipologia l'attacco subito dal contingente italiano di stanza a Nassiriya.
- Inganno: il veicolo ostile può introdursi all'interno delle barriere utilizzando false credenziali ed eludendo il servizio di guardia. L'unico modo per scongiurare completamente questo tipo di minaccia è il controllo e l'ispezione di ogni singolo mezzo in entrata. Questa soluzione non risulta però funzionale nel caso in cui vi sia un flusso di transito intenso, in quanto si provocherebbe la congestione del traffico.
- Coercizione: è possibile che la cellula terroristica forzi il piantone di guardia a fare in modo che il veicolo oltrepassi le barriere. In questo caso l'unica difesa possibile è l'installazione di un sistema di ostacoli fissi intorno all'edificio, che creino una zona invalicabile da parte di qualsiasi mezzo, in modo da avere un minimo di stand-off distance garantito. (2)

Gestione del traffico

Una misura di sicurezza fondamentale è rappresentata dallo studio dei flussi di utenti entranti all'interno dell'area di competenza dell'edificio da proteggere.

Si possono individuare quattro diverse filosofie di gestione del traffico, riportate di seguito in ordine di sicurezza:

- Divieto assoluto di transito: è il provvedimento più drastico, ma al contempo è l'unico in grado di garantire un livello elevato di sicurezza. Si cerca di evitare che qualsiasi tipo di mezzo possa avvicinarsi all'edificio, assicurandosi così il rispetto della stand-off distance prevista, sia negando il transito, sia negando la sosta. Infatti molti attentati, in particolare quelli in cui non è previsto il suicidio del terrorista, vengono realizzati sfruttando veicoli parcheggiati in prossimità del bersaglio.
- Divieto parziale di transito: alcuni veicoli vengono ammessi nell'area, ma per entrare devono superare il controllo ad una postazione di guardia. Questo sistema non garantisce una protezione totale, in quanto un intruso potrebbe violare il cordone di sicurezza forzando le barriere con un attacco diretto o eludendo i sistemi di guardia camuffandosi da mezzo autorizzato. Non è neanche da escludere l'eventualità che un utente abituale autorizzato possa sfruttare la sua posizione e la confidenza acquisita nel tempo con la vigilanza per colpire il suo obiettivo. Questa soluzione è stata adottata lungo il tratto di Pennsylvania Avenue che costeggia il parco della Casa Bianca, nel quale sono ammessi solo mezzi di servizio .
- Transito consentito nella maggior parte dell'area intorno all'edificio: non è possibile garantire una stand-off distance adeguata, e diviene necessario l'impiego di sistemi di rinforzo in prossimità delle parti più vulnerabili.
- Barriere mobili: possono essere utilizzate nei momenti in cui si prevede una possibile minaccia. Tuttavia si riconoscono una serie di svantaggi:
 - la disposizione è basata su una previsione della possibile minaccia;
 - possono essere disposte quando ormai la minaccia si trova all'interno della zona da rendere sicura;
 - il sistema di barriere richiede maestranze specializzate e tempo per essere posizionato;
 - sono meno efficaci, rispetto ai sistemi fissi, contro gli sfondamenti;
 - generalmente sono costituite da elementi modulari, simili a spessi muri, che non trovano facile impiego su terreni scoscesi e non regolari;
 - l'impatto estetico ne preclude l'impiego in alcuni contesti;
 - la loro massa ne può precludere l'impiego se si ha una base di appoggio "debole" come un solaio o un ponte.
 - il bisogno di costituire una barriera che possa permettere il passaggio dei pedoni può minare l'efficienza strutturale del sistema;
 - la necessità di un sito di stoccaggio in prossimità della zona da difendere.

Per garantire la massima efficienza dei sistemi sopra riportati, è necessario approntare una serie di misure al fine di rallentare i veicoli in avvicinamento alle barriere. In questo modo si fa intendere all'autista del mezzo in avvicinamento cosa ci si aspetta da

lui in prossimità del gate, si fornisce al corpo di guardia un tempo maggiore per valutare l'automezzo e i suoi occupanti e un maggior tempo di reazione nel caso costituiscono una minaccia. Inoltre, riducendo la velocità, si riduce l'efficacia del mezzo se utilizzato come ariete per forzare le barriere, permettendo così di utilizzare strutture meno "pesanti" e più economiche.

Il rallentamento del traffico può essere attuato con l'utilizzo di deviatori verticali, come dossi artificiali, o, nel caso in cui siano disponibili spazi ampi, con la realizzazione di chicanes (deviatori orizzontali). Le chicanes devono essere comunque accoppiate con barriere verticali, necessarie per costringere i mezzi a rispettare il percorso e impedire che le curve vengano tagliate. Questo provvedimento potrebbe precludere il transito a mezzi di grandi dimensioni con angoli di sterzata ridotti, perciò si predilige l'utilizzo di barriere mobili, per non precludere l'ingresso a nessun mezzo.

Nel progetto di una chicanes gli aspetti fondamentali da considerare sono:

- le dimensioni massime dei mezzi che si prevede possano transitare;
- la dimensione della strada e il numero di corsie;
- lo spazio disponibile per permettere l'inversione di marcia ai veicoli non ammessi.

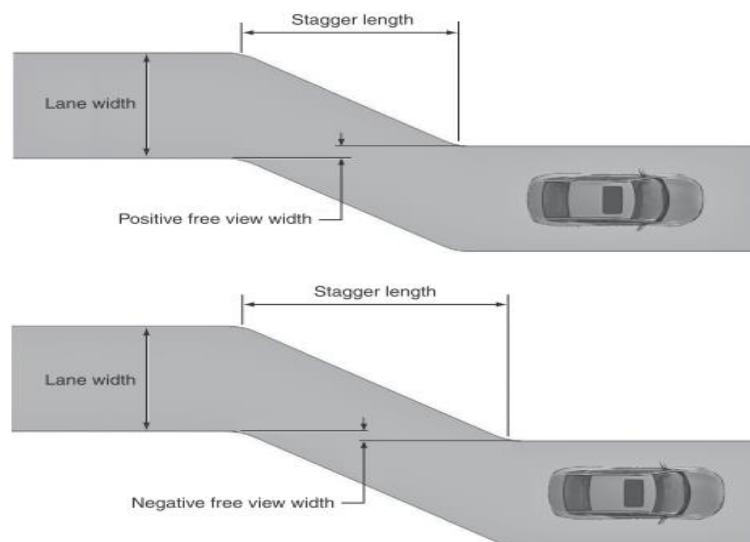


Figura 68. Parametri nel progetto delle chicanes. (2)

Le chicanes, per essere efficaci, devono essere posizionate in prossimità dei checkpoint, in modo da non lasciare spazio di riaccelerazione tra il gate e la chicane stessa.

Il loro scopo è infatti quello di rallentare i mezzi in avvicinamento, per evitare che tentino lo sfondamento sfruttando la loro velocità.

E' possibile riconoscere tre configurazioni base per la realizzazione di un checkpoint all'entrata di un'area :

- linea singola: costituita da un sistema di recinzione, una postazione di controllo degli accessi presidiata e un elemento di ostruzione della carreggiata, realizzato con una cancellata, una sbarra in acciaio o dissuasori retrattili inseriti nel terreno.

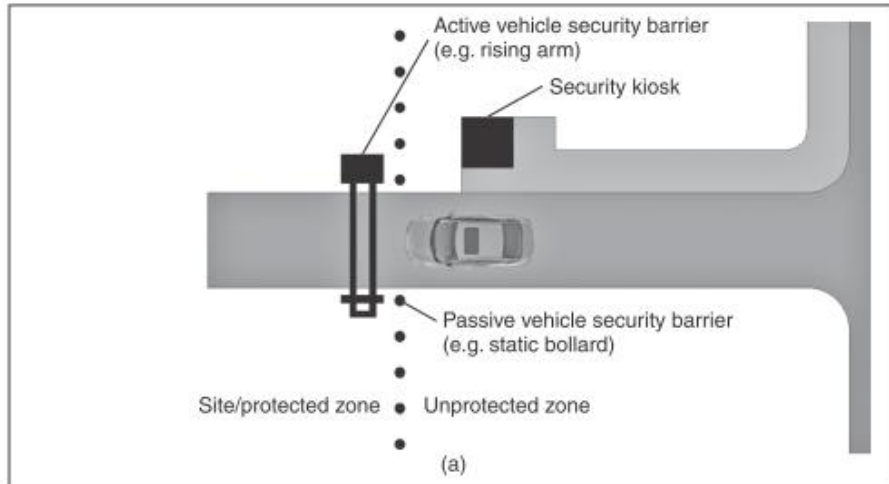


Figura 69. Barriera a linea singola. (2)

- doppia linea: questa configurazione prevede, in aggiunta agli elementi presenti per la tipologia a singola linea, una seconda postazione di blocco della carreggiata.

In questo modo è possibile creare una zona “cuscinetto” sicura tra l’esterno e l’interno dell’area protetta. Perché risulti una misura efficace, è di fondamentale importanza che i gate non siano aperti contemporaneamente, e che la seconda linea venga aperta solo a seguito dell’esito positivo dei controlli sul veicolo effettuati nella prima postazione.

Questa è sicuramente una misura di sicurezza efficace, ma di contro richiede maggiori spazi e investimenti rispetto alla tipologia a linea singola, ed inoltre tende a rallentare molto il flusso di traffico in entrata.

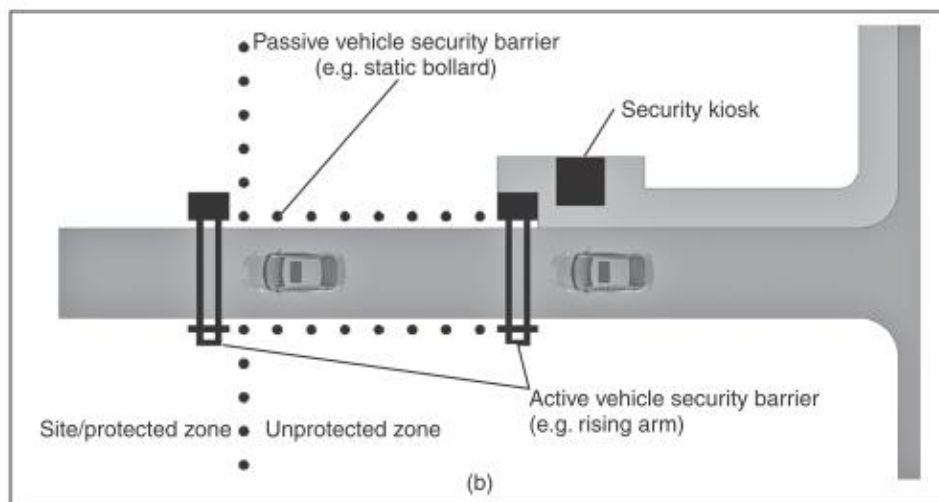


Figura 70. Barriera a doppia linea. (2)

- doppia linea con barriera di rifiuto finale: costituito da due postazioni chiave, la prima di semplice controllo, mentre la seconda di blocco di un eventuale mezzo non autorizzato. Quest’ultima rimane sempre aperta in modo da non rallentare il traffico in entrata e viene chiusa solo nel caso venga rilevata una minaccia

dalla postazione di controllo. Questa soluzione è sicuramente meno sicura della precedente, in quanto la propria efficienza dipende dalla capacità di riconoscere una minaccia da parte del corpo di guardia e dalla sua velocità di reazione nel dare l'allarme.

Per questo motivo non è un sistema utilizzato per la difesa di edifici particolarmente sensibili, ma risulta comunque un buon compromesso nel caso si ricerchi un discreto livello di protezione senza dover ostacolare il traffico. (2)

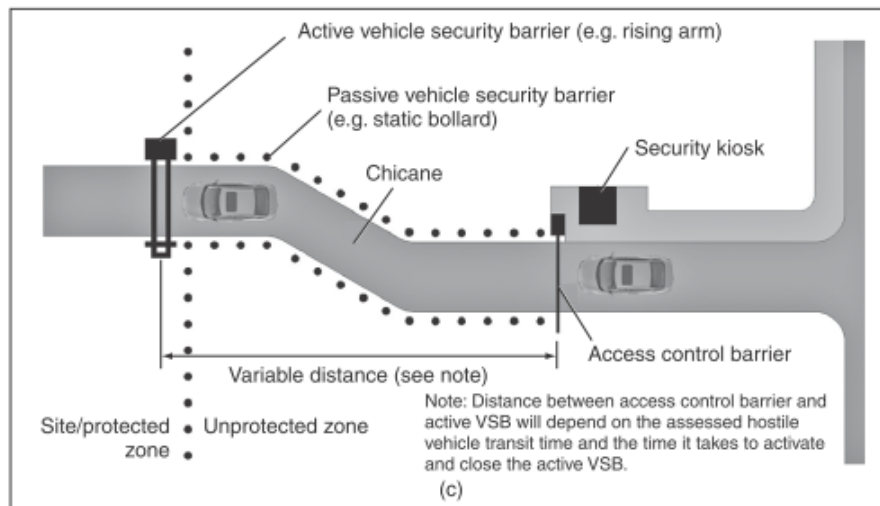


Figura 71. Barriera a doppia linea con rifiuto finale. (2)

L'importanza di adottare disposizioni in grado di rallentare, incanalare e monitorare i mezzi in approccio a un'area sensibile è stata provata una decina di anni fa proprio sulla pelle dell'esercito italiano, in occasione dell'attacco subito dal contingente di stanza a Nassiriya, Iraq.

Nonostante si tratti di un evento avvenuto contro un presidio dell'esercito, si possono individuare spunti utili alla nostra trattazione, innanzi tutto per l'arma utilizzata, un'autobotte carica di esplosivo e per il contesto, l'ambiente urbano, chiaramente una località molto "calda", seppur non ufficialmente dichiarata zona di guerra.

Il compito del contingente italiano era quello del peacekeeping, ovvero assistenza alla popolazione, addestramento delle autorità locali e polizia militare. Tutte queste mansioni prevedono l'autorizzazione ad utilizzare le armi da fuoco solo in caso di minaccia per rispondere ai colpi ricevuti dall'avversario.

La postazione di comando attaccata era chiamata Base Maestrale e si trovava presso un incrocio stradale in corrispondenza del ponte che attraversa l'Eufrate ad ovest della cittadina.

Si trattava di una posizione installata all'interno dell'ex camera di commercio, una piccola palazzina dotata di tre piani fuori terra.

L'attacco venne compiuto il 12 novembre del 2003, quando un autocisterna armata con 300 kg di esplosivo proveniente da sud attraversò a tutta velocità il ponte sull'Eufrate e, giunta in prossimità della base italiana, si scagliò contro le barriere di ingresso, sfondandole e penetrando all'interno del caposaldo, per poi esplodere sventrando parte dell'edificio e uccidendo 28 persone.

L'inchiesta per ricostruire le dinamiche della tragedia mise in luce le scarse misure di difesa con cui era fortificata la posizione: il perimetro era delimitato da un reticolo di filo spinato accoppiato a un cordone di hesco bastions, una sorta di sacchi rinforzati da maglie metalliche che vengono riempiti con la sabbia, la cui stabilità è garantita dal proprio peso.

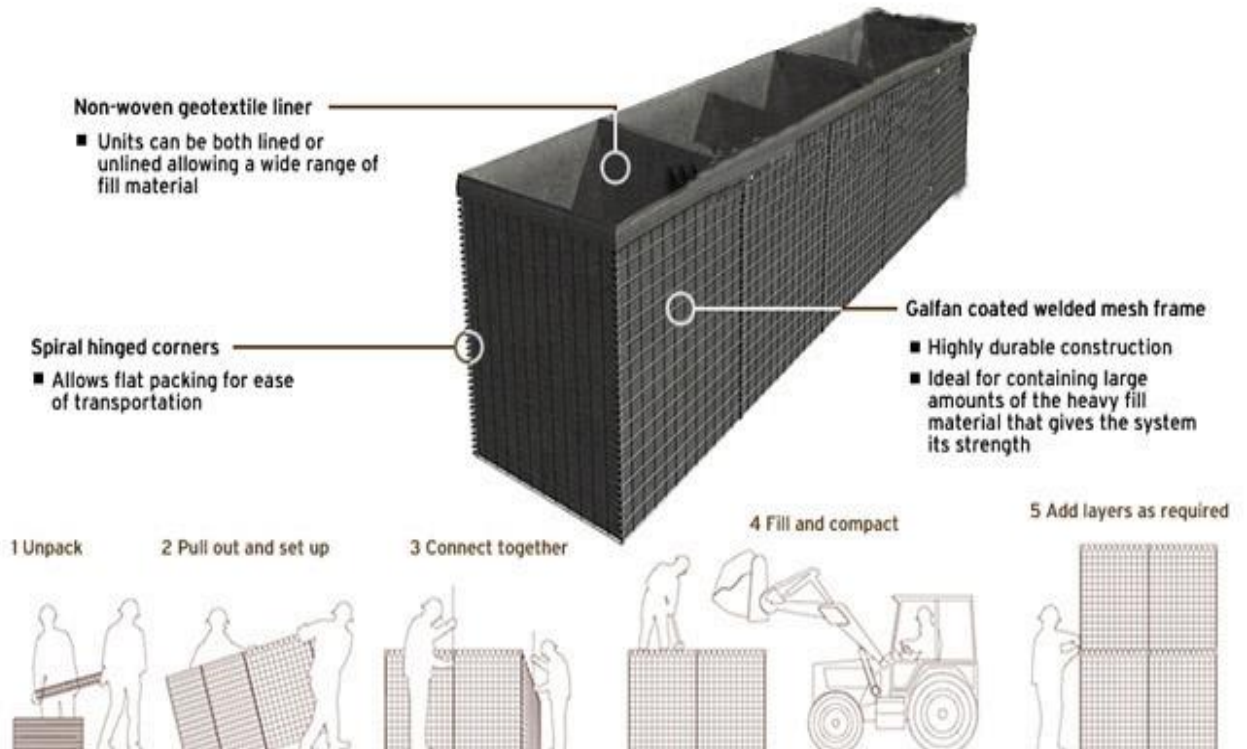


Figura 72. Sequenze di posa di una barriera di Hesco bastions. Fonte Hesco.

L'accesso, parallelo alla strada che attraversa il ponte, era del tipo a linea singola, con una sbarra di acciaio a precludere il passaggio per i mezzi, e cavalli di frisia con filo spinato per ostacolare le persone. La postazione di controllo era a fianco della sbarra, armata con una mitragliatrice e rinforzata mediante sacchi di sabbia.

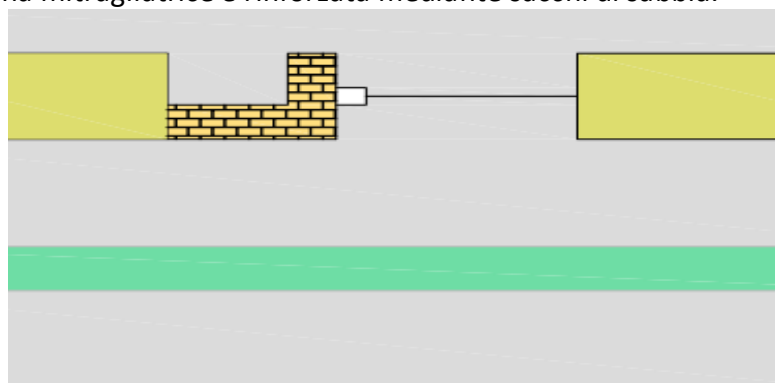


Figura 73. Accesso alla base di Nassiriya. Nello schema si possono individuare le due carreggiate della strada delimitate da uno spartitraffico costituito da un'aiuola, la recinzione realizzata con gli Hesco bastions, la sbarra metallica di ingresso e, al suo fianco, la postazione di guardia armata di mitragliatrice e realizzata mediante la sovrapposizione di sacchi di sabbia.

La facilità con la quale è stata sfondata la barriera di accesso ha reso impotenti i militari a presidio della zona, che, nonostante tutto, sono riusciti a bloccare il veicolo sparando al conducente mentre si avvicinava, scongiurando danni più ingenti.

La situazione è stata aggravata dalla presenza di un deposito di munizioni nel piazzale antistante l'edificio che è stato inesorabilmente coinvolto dall'esplosione, contribuendo ad amplificarne gli effetti, basti pensare che alcune delle vittime sono decedute per ferite d'arma da fuoco provocate dai proiettili esplosi stipati in questa polveriera.

Inoltre ad aggravare la situazione è stato il riempimento degli hesco bastions, non sabbia come di regola, ma ghiaia, completamente incapace di assorbire l'onda d'urto, e addirittura trasformata in proiettili scagliati a centinaia di metri di distanza, con un effetto simile a quello di una granata.



Figura 74. Vista della Base Maestrale dopo l'attacco. (Sky)

Si può notare l'autocisterna carbonizzata, le barriere e l'edificio distrutto. In basso a sinistra si vede il ponte da cui è arrivato il mezzo. Come si può notare il perimetro difensivo e soprattutto l'accesso, si affacciano direttamente sulla strada.



Figura 75. Vista del perimetro difensivo realizzato mediante hesco bastions. (Rainews)



Figura 76. Vista dalla strada principale della Base Maestrale. (La Stampa)

Si può notare la grande vicinanza tra la sede stradale e l'edificio. Le barriere hesco bastions, come da corretto funzionamento, si sono rotte a seguito dell'esplosione. Il loro compito nei riguardi delle esplosioni è quello di assorbire l'onda d'urto, e, essendo sostanzialmente dei sacchi, è normale che si rompano. Per quanto riguarda il comportamento contro gli autoveicoli, gli "hesco" sfruttano la loro massa per opporsi all'impatto. Il modello alto 2,20 m è considerato insuperabile da parte di qualsiasi tipo di veicolo convenzionale.

Alla luce di tutti questi elementi appare evidente come, non soltanto le difese fossero inadeguate, ma sicuramente anche la scelta del luogo dove posizionare il presidio. Dato il contesto non era possibile posizionare le difese più lontano rispetto l'edificio e soprattutto sviluppare un accesso secondo lo schema della doppia linea seguendo una configurazione tipica delle postazioni militari, in quanto si sarebbe occupata gran parte della carreggiata della strada.

Premesso quindi che l'errore è stato a monte, nella scelta di posizionare la base in città "per poter meglio integrarsi e interagire con la popolazione locale", e soprattutto in quello specifico edificio, si sarebbe potuto limitare i danni semplicemente adottando i seguenti provvedimenti:

- posizionare in un luogo meno esposto il deposito di munizioni;
- riempire i "sacchi" con la sabbia (non la ghiaia); e
- posizionare una serie di ostacoli, come i già tanto citati hesco bastion, a pochi metri di fronte all'entrata, in modo da non intralciare la strada e impedire l'ingresso diretto di un mezzo e costringerlo a compiere delle deviazioni in modo da indurlo a rallentare e fornire più tempo di reazione agli uomini di guardia.

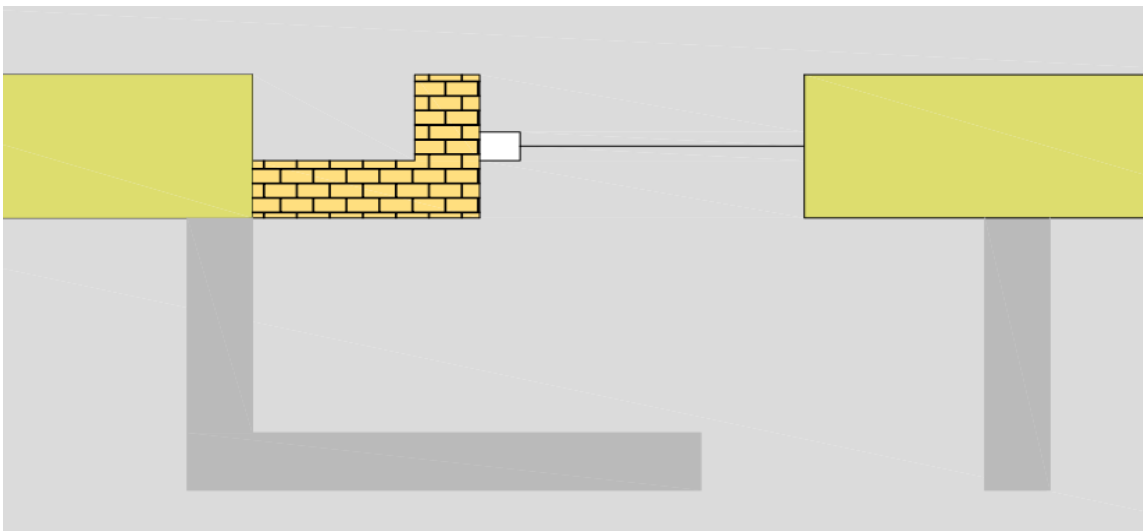


Figura 77. Protezione dell' accesso.

L'immagine raffigura un semplice accorgimento che sarebbe potuto essere utile per impedire al veicolo di penetrare nel perimetro della base. Al cordone di sicurezza esistente costituito dagli hesco bastions, la postazione di guardia in sacchi di sabbia e la sbarra in acciaio, vengono aggiunte due braccia che possono essere realizzate con gli stessi H. bastions o con barriere jersey. Il loro compito è quello di creare una chicane per impedire l'accesso diretto e portare i veicoli a rallentare. Questa soluzione non sarebbe stata invasiva rispetto alla strada, in quanto si prevede che sporga rispetto alla barriera esistente di circa 3,5 m, affacciandosi su una carreggiata che alcune fonti riportano fosse chiusa al traffico.

Vehicle security barriers (vsb)

Le vsb rappresentano “the hard stop” contro gli attacchi diretti che prevedono lo sfondamento delle barriere. I vsb sono veri e propri elementi strutturali, che possono essere passivi, oppure attivi, comandati manualmente o automatici.

I sistemi passivi comprendono:

- elementi architettonici come aiuole e panchine;
- terrapieni e trincee;
- barriere jersey;
- paletti anti traffico e cavalli di frisia ;
- alberi;
- piccoli edifici o grandi elementi strutturali.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 78. Esempi di sistemi di sicurezza passivi: (a)(b) aiuole, (c)(d)(e) pali anti-traffico, (f) balaustra in muratura. (2)

Le misure attive sono costituite da:

- paletti anti traffico retrattili;
- cancelli scorrevoli e a cerniera;
- sbarre rinforzate;
- plate barrier;
- tiger trap.



(a)



(b)



(c)

Figura 79. Esempi di sistemi attivi:

(a) dispiegamento temporaneo di barriere modulari e cancello a cerniera, (b) dissuasori retrattili (centro strada) e paletti fissi sul marciapiede, (c) sbarra armata. (2)

Barriere di sicurezza passiva per i veicoli

Al fine di integrare e migliorare l'ambiente urbano, sono stati sviluppati elementi architettonici con la doppia valenza di elementi di decoro ed elementi di protezione. Già i romani posizionavano ai bordi delle strade muretti in pietra, grossi massi, abbeveratoi per gli animali e postazioni di stabulazione al fine di proteggere le persone dal traffico di mezzi trainati dai cavalli. Ai giorni nostri generalmente vengono impiegate aiuole e altri tipi di arredo urbano rinforzato, come panchine e alberi, sia in corrispondenza dei marciapiedi, per proteggere i pedoni, sia in prossimità degli edifici per proteggerli da possibili "Vehicle borne threats".

Le aiuole presentano una struttura in calcestruzzo, possono essere vincolate mediante

una fondazione interrata o tramite barre metalliche affioranti dal terreno, nel quale vengono tassellate con resine apposite, oppure possono essere semplicemente appoggiate al terreno, affidando la loro stabilità alla forza di gravità.

Un sistema di difesa altrettanto efficace è rappresentato dalla morfologia del terreno, è infatti possibile sfruttare avvallamenti, ammassi rocciosi e corsi d'acqua per poter scongiurare il transito di qualsiasi tipo di veicolo. Questi ultimi sono sicuramente la forma di difesa più antica, infatti da sempre l'uomo ha sfruttato le risorse messe a disposizione della natura, e, dove non erano disponibili, ha saputo intervenire sul terreno modellandolo a proprio piacimento.

L'esempio più semplice di questo tipo di interventi è rappresentato dallo scavo di trincee e dalla realizzazione di terrapieni. Le trincee sono nate infatti come strumento per rallentare e rendere difficoltosa l'avanzata degli eserciti: nell'antichità venivano ostacolati i fanti pesantemente armati e i cavalli, ai giorni nostri i carri armati e gli automezzi.

L'utilizzo dei terrapieni o fossati, per quanto sia una soluzione low cost e semplice, richiede una modesta manutenzione, per assicurarsi che mantengano la loro integrità ottimale per opporsi alle intrusioni. Questo aspetto riguarda in particolare i primi, che devono mantenere un'altezza e una ripidezza adeguata della faccia che deve opporsi all'impatto. A questo proposito il progettista deve valutare la compattazione, l'erosione e la stabilità del materiale utilizzato ed adottare opportuni provvedimenti per controllarli, come l'impiego di tessuti geotessili, in grado di trattenerne il materiale e far defluire l'acqua, fattore principale di danno per gli ammassi di terreno. Tuttavia, per quanto soluzioni efficaci, non trovano molta fortuna in contesti di tipo urbano (salvo il caso raro degli ammassi di terreno presso il palazzo di giustizia di Minneapolis), per via degli spazi limitati e dell'impatto visivo che possono generare.

Vengono invece adottati frequentemente per rinforzare le recinzioni delle industrie e delle basi militari.

Anche l'utilizzo di alberi, dotati di adeguata circonferenza e forte apparato di radici, rappresenta una soluzione molto diffusa, anche se nel caso di impatto con grossi veicoli non risultano efficaci quanto una struttura in calcestruzzo o un'opera in terra. Gli alberi posti in prossimità dei confini dell'area devono essere curati perchè, con i rami, non costituiscano un sistema per scavalcare una eventuale recinzione, oppure non oscurino con il fogliame la vista agli addetti della sorveglianza. Questa soluzione tuttavia presenta il limite di non poter essere impiegata, come unico provvedimento per poter definire un determinato perimetro di sicurezza, in quanto risulta difficile ed oneroso disporre di un numero di alberi con caratteristiche dimensionali tali da poter confinare un'area. Si predilige infatti l'accoppiamento con altri sistemi artificiali più versatili, come elementi in calcestruzzo, lasciando all'albero un compito prevalentemente decorativo.

In ambiente urbano, per ovvie ragioni estetiche e funzionali, è molto diffuso l'utilizzo dei bollards statici (categoria che raccoglie tutte le svariate tipologie di paletti anti traffico).

Questi possono costituire sia un sistema resistente a prova di impatto, sia una semplice barriera percettiva, trattandosi di modelli in grado di offrire una scarsa resistenza.

In commercio sono disponibili numerosi prodotti in grado di rappresentare al meglio le due categorie sia dal punto di vista funzionale che estetico.

Nel caso si adottino sistemi puntuali come dissuasori, paletti o alberi, l'esperienza ha sentenziato che per aver una protezione soddisfacente è necessario mantenere una spaziatura tra gli elementi non superiore a 1200 cm, in modo da ottenere un sistema forte e impenetrabile anche dai mezzi più piccoli.

Citiamo infine le barriere jersey, un dispositivo di sicurezza modulare realizzato in calcestruzzo o PVC. Vengono largamente utilizzate nelle applicazioni comuni come spartitraffico temporanei in corrispondenza dei cantieri stradali, grazie alla loro versatilità, velocità di posa (non necessitano di fondazioni) e flessibilità di utilizzo. Sono proprio queste caratteristiche che hanno determinato il loro successo anche come barriere anti intrusione non permanenti.

L'utilizzo temporaneo è determinato dal fatto che in un ambiente urbano non rappresentano un elemento esteticamente integrabile con il contesto, per cui per progetti permanenti si prediligono per esempio bollards o aiuole dal carattere più discreto, e soprattutto in grado di apparire come ornamenti, non come barriere di sicurezza.

Quest'ultimo aspetto è molto importante ed agisce fortemente sulla psicologia degli utenti di un'area: una persona che si trova in un contesto caratterizzato dalla presenza di dispositivi con la sola funzione difensiva, come appunto barriere jersey, trincee o recinzioni, finirebbe per avere una elevatissima percezione del fatto che si trova in un ambiente a rischio, vedendo così i sistemi di sicurezza, non come elementi favorevoli, ma come fattori che ricordano continuamente la minaccia imminente causando uno stato di turbamento nella mente dell'individuo. Questo è un concetto basilare per quanto riguarda la progettazione delle difese di aree urbane, il cui obiettivo è sì la massima sicurezza, ma celata agli occhi distratti dei comuni cittadini grazie ad una sapiente e ponderata integrazione delle misure adottate. Agli occhi dei funzionari governativi americani questa situazione sarebbe in grado di minare i principi basilari su cui si basa una società aperta e democratica. (36)



Figura 80. American Indian Museum, Washington. (31)

Nell'immagine a sinistra si nota la presenza di dissuasori (bollards) accoppiati con dei grossi massi per prevenire l'accesso da parte di veicoli. E' evidente la doppia valenza, architettonica e di sicurezza, dei massi. A destra invece sono raffigurate le aiuole, che formano, insieme ai bollards e alle pietre, una linea difensiva impenetrabile da parte di un automezzo ostile.



Figura 81. Federal Courthouse, Minneapolis. (31)
Per assicurare una adeguata stand off distance è stata realizzata una piazza dinnanzi alla facciata principale dell'edificio. Su di essa, per scongiurare il passaggio di eventuali veicoli, sono state realizzate delle aiuole, costituite da montagne di terra ricoperte di erba e bollards in cemento.



Figura 82. Hennepin County Courthouse, Minneapolis. (31)
Per evitare l'intrusione nella stand off zone sono state realizzate delle banchine in cemento in cui sono stati piantati degli arbusti di modeste dimensioni. Nell'immagine a destra si nota la presenza di un singolo dissuasore al centro del passaggio pedonale, per evitare che venga percorso da autoveicoli.



Figura 83. Wall Street Financial District, NY.
A sinistra un esempio di bollards di design, che svolgono la duplice funzione di arredo urbano e sicurezza. A destra, tra la strada e il marciapiede, troviamo una "vasca" contenete sculture artistiche. (31)



Figura 84. A sinistra: Columbia University, Broadway, Upper West Side, NY.

Una barriera in cemento disposta sul limitare del marciapiede svolge la duplice funzione di protezione dei pedoni dall'evolversi di eventuali incidenti stradali e protezione degli edifici della Columbia da possibili minacce terroristiche. (28)

Figura 85. A destra: Downtown Brooklyn Courthouse, NY.

In questo caso si nota una doppia linea di difesa: una serie di bollards in cemento e in acciaio a delimitare il marciapiede e un filare di alberi in prossimità della facciata dell'edificio. (28)

Barriere di sicurezza attiva per i veicoli

I sistemi di sicurezza attiva sono generalmente posizionati nei punti di accesso dell'area di interesse dell'edificio, possono essere distinti in due categorie:

- barriere ad azione manuale, comprendenti la barriera stessa, un sistema di fondazione e un operatore che si occupa dell'apertura e chiusura;
- barriere automatizzate, comprendenti la barriera stessa, fondazioni, sistema di alimentazione e controllo, meccanismo guida. Possono essere azionate da un operatore oppure da un sistema di controllo automatico.

Il notevole sviluppo di diverse tipologie di barriere per ovviare a tutte le possibili minacce, permette di individuare ulteriormente diverse classi, legate alla funzione specifica per le quali sono impiegate:

- barriere di controllo degli accessi: non dispongono di alcuna resistenza strutturale in grado di opporsi al transito di un veicolo. Vengono di solito utilizzate all'ingresso dei parcheggi o degli edifici commerciali. Generalmente sono rappresentati da sbarre di alluminio;
- barriere anti intrusione: utilizzate per controllare gli accessi e per prevenire e scoraggiare l'intrusione di mezzi non autorizzati. Risultano all'apparenza molto resistenti, anche se poi non è scontato che siano in grado di resistere ad un vero e proprio attacco.

Fanno parte di questa categoria i paletti anti traffico, i dissuasori (modelli appartenenti alle classi di resistenza minori) e le cancellate;



Figura 86. A sinistra: New York City Hall, NY. (31)

Cancellata di entrata, rinforzata dalla presenza di un cuneo anti traffico.

Figura 87. A destra: New York City Hall Park, NY. (31)

Viene rappresentata una delle entrate al parco, regolata da un cancello metallico per i pedoni e una coppia di bollards retrattili per gli automezzi.

- barriere anti sfondamento: adottate per resistere all'urto frontale con automezzi lanciati a una velocità sostenuta. Vengono impiegate presso gli edifici militari e governativi, stadi, impianti industriali, depositi di banche e materiali preziosi. Ne fanno parte:
 - "plate barrier", elementi in acciaio incassati nel terreno e azionati da un sistema idraulico, che sono in grado di bloccare un veicolo di cinque tonnellate lanciato a 80 Km/h(categoria k12, la più elevata);
 - sbarre in acciaio, montate su sostegni a prova di impatto e vincolate da un cavo in acciaio presente nel braccio della sbarra, che quando è in posizione abbassata, viene ancorato in corrispondenza dei due supporti laterali;
 - "bollards" retrattili, sistemi molto diffusi, sia per la loro efficienza, sia per il minimo impatto estetico. Sul mercato sono disponibili una vasta gamma di prodotti che si differenziano per forma, prestazioni e, in particolare, impianto di movimentazione. Le tre tipologie disponibili sono: alimentazione manuale, richiede la presenza di un operatore; idraulica, necessita di spazi modesti in cui alloggiare le pompe, i serbatoi del fluido e i tubi; elettrica, sicuramente la soluzione più all'avanguardia, anche se la più cara. Quest'ultima ha il vantaggio di non essere ingombrante e non necessita di una frequente manutenzione come i sistemi idraulici, per cui può essere installata senza problemi in numerosi contesti.
- Piattaforme girevoli, sono l'evoluzione dei dissuasori passivi. Presentano una fondazione superficiale realizzata con profilati in acciaio galvanizzato. Il sistema di movimentazione è elettrico e posizionato all'interno della porzione girevole della fondazione. La superficie può essere realizzata con qualsiasi materiale, dall'asfalto alle piastrelle, e può ospitare bollards metallici di qualunque forma e dimensione, garantendogli un sistema di vincolo ad alta efficienza (categoria k12).
- "Tiger trap", sono un sistema sviluppato dallo studio di architettura Rogers Marvel di New York. La sua caratteristica principale è quella di non prevedere alcun sistema di barriera visibile, risultando perciò per nulla invasivo nei riguardi del contesto in cui viene utilizzato. Questo concetto è una risposta alla necessità, già

dibattuta in precedenza, di realizzare luoghi sicuri senza che le difese siano intese come tali dagli utenti. Il dispositivo è costituito da una trincea chiusa in sommità da un sistema di copertura in grado di supportare il peso dei mezzi a cui è consentito il passaggio. Nel caso in cui tenti il transito un veicolo con una stazza non prevista, la copertura cede, facendolo sprofondare nell'avvallamento e arrestandone la corsa.

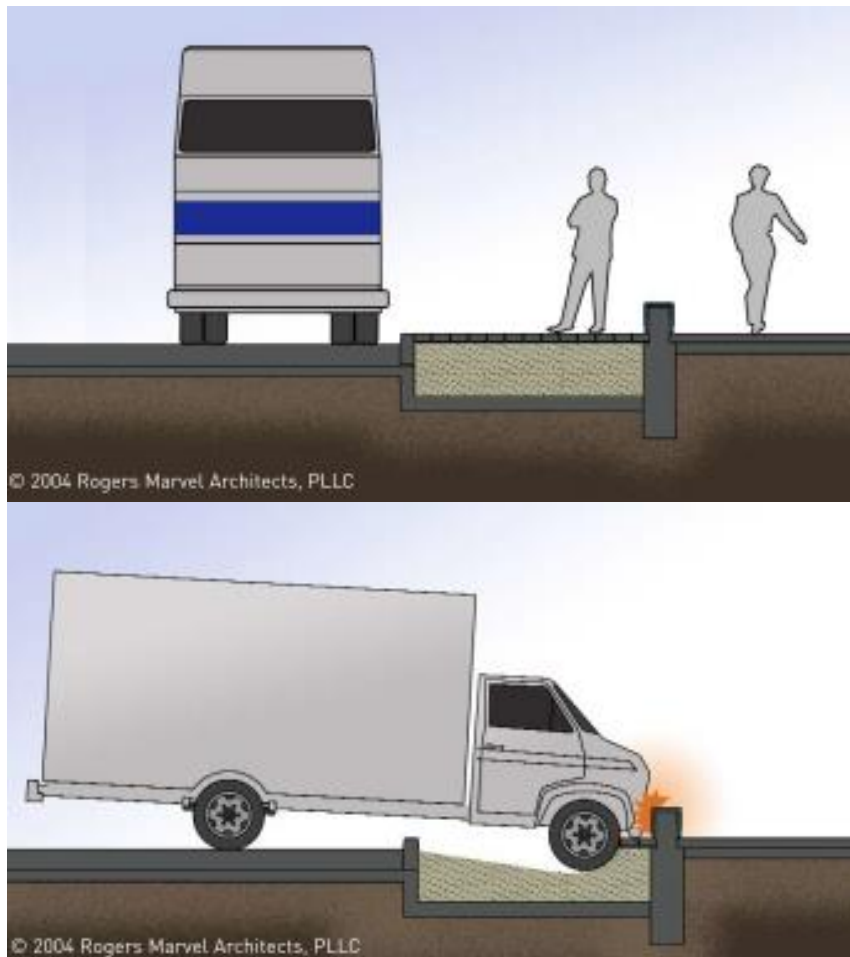


Figura 88. Vista in sezione di una Tiger Trap: (35) può essere utilizzata per difendere il perimetro di un'area entro la quale si vuole precludere il transito dei mezzi. E' un sistema molto semplice e discreto, in quanto non prevede dispositivi di movimentazione e barriere a vista. Questa soluzione è stata studiata per l'impiego nei contesti urbani per non appesantirli con elementi di superficie, sfruttando l'esperienza maturata in campo militare, nel quale sono adottate perché risultano non rilevabili da un osservatore esterno e di conseguenza in grado di sorprendere l'avversario.

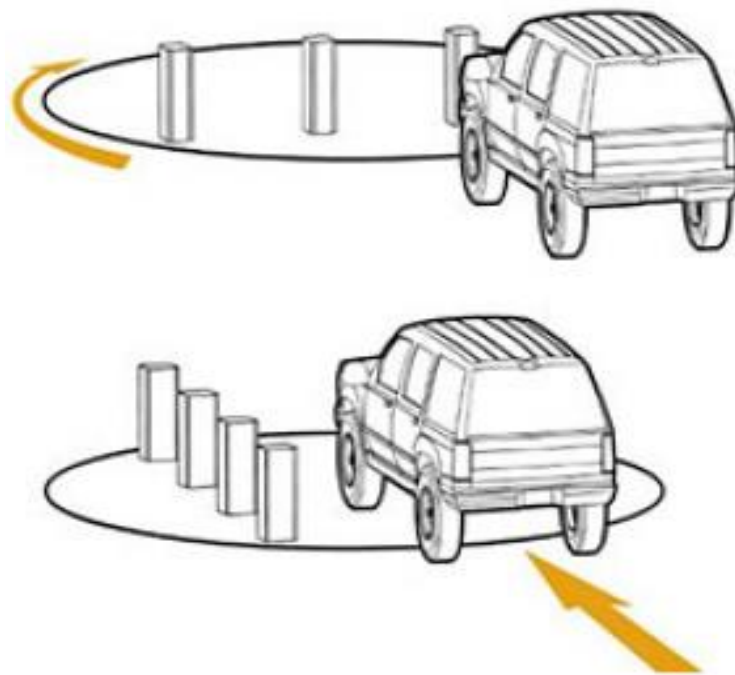


Figura 89. Schema di funzionamento di una piattaforma girevole ad alimentazione elettrica e munita di quattro dissuasori. (28)



Figura 90. Vista ed esempio applicativo di una piattaforma girevole munita di bollards. (28)



Figura 91. Sequenza di un crash test eseguito su una piattaforma girevole, (23) per verificare la rispondenza alla categoria K12: veicolo da 5 ton che viaggia a 80 km/h.

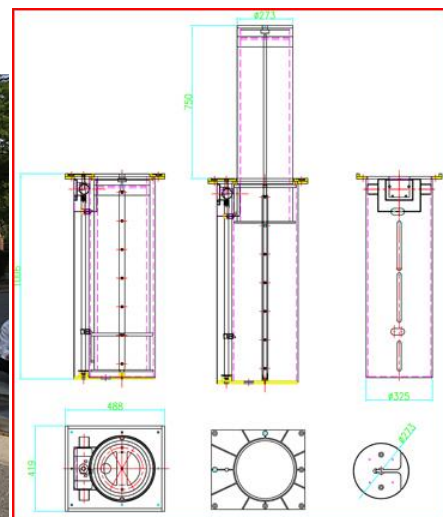


Figura 92. A destra: sezione del sistema di guide di un dissuasore retrattile ad azione manuale.(30) Alla base dell'elemento è presente una serratura che funge da blocco quando il braccio è in posizione. Figura 93. A sinistra: vista del sistema di sollevamento di una plate barrier posizionata in un checkpoint all'ingresso di un'area protetta. (automaticbollards)



Figura 94. A sinistra: Campidoglio, Washington. (28)

Per ostruire l'accesso all'area retrostante il Campidoglio è stata installata una plate barrier accoppiata con dei dissuasori e muretti i cemento.

Figura 95. A destra: U.S. Federal Buildig, Washington. (29)

L'accesso è regolato da una sbarra in acciaio. Si noti il sistema di vincolo realizzato con pesanti blocchi in calcestruzzo prefabbricati.

Sistemi di fondazione per le barriere

L'energia con la quale un autoveicolo in movimento impatta contro una barriera protettiva viene stabilita a partire dall'energia cinetica, definita come $KE = \frac{1}{2}mv^2$, con m e v rispettivamente massa e velocità del veicolo.

Test Vehicle/Minimum Test Inertial Vehicle, kg (lbm)	Nominal Minimum Test Velocity, km/h (mph)	Permissible Speed Range, km/h (mph)	Kinetic Energy, KJ (ft-kips)	Condition Designation
Small passenger car (C) 1100 (2430)	65 (40)	60.1-75.0 (38.0-46.9)	179 (131)	C40
	80 (50)	75.1-90.0 (47.0-56.9)	271 (205)	C50
	100 (60)	90.1- above (57.0-above)	424 (295)	C60
Pickup truck (P) 2300 (5070)	65 (40)	60.1-75.0 (38.0-46.9)	375 (273)	PU40
	80 (50)	75.1-90.0 (47.0-56.9)	568 (426)	PU50
	100 (60)	90.1- above (57.0-above)	887 (613)	PU60
Medium-duty truck (M) 6800 (15 000)	50 (30)	45.0-60.0 (28.0-37.9)	656 (451)	M30
	65 (40)	60.1-75.0 (38.0-46.9)	1110 (802)	M40
	80 (50)	75.1-above (47.0-above)	1680 (1250)	M50
Heavy goods vehicle (H) 29 500 (65 000)	50 (30)	45.0-60.0 (28.0-37.9)	2850 (1950)	H30
	65 (40)	60.1-75.0 (38.0-46.9)	4810 (3470)	H40
	80 (50)	75.1-above (47.0-above)	7280 (5430)	H50

Figura 96. Energia di impatto. (28)

La tabella, tratta dalla normativa americana, riporta i valori di energia cinetica sviluppati per quattro categorie di veicoli, indicando la classe di protezione richiesta (colonna a destra).

Il sistema di fondazione è un elemento fondamentale della barriera, in quanto ne determina la capacità di assorbire l'energia sviluppata a seguito di un impatto violento. Tuttavia la maggior parte dei sistemi di sicurezza non prevedono grandi elementi di fondazione, tanto che, per opporsi all'urto, alcuni fanno affidamento solamente alla loro massa. Non sempre infatti è possibile realizzare sistemi di fondazione, sia per la

possibile presenza di reti impiantistiche nel sottosuolo, sia perché si preferiscono tipologie di barriere mobili, che risultano tuttavia meno efficaci. Per quanto riguarda il caso specifico dei dissuasori statici, a cui si richiede di resistere ad impatti notevoli, vengono adottate come fondazioni travi continue in cemento armato, in modo da ridurre gli spostamenti dell'elemento a seguito dell'impatto. Esistono anche sistemi prefabbricati più veloci e semplici da installare, è il caso dell'utilizzo di un telaio eseguito in acciaio sul quale si innestano i dissuasori. Non richiedono uno scavo profondo più di 30-40 cm e dopo la posa in opera vengono ricoperti dal manto stradale. La loro resistenza è affidata non tanto alla profondità della fondazione, ma alla sua estensione in orizzontale: fungendo da base di appoggio il telaio in acciaio si oppone al ribaltamento e il terreno circostante ne impedisce il movimento.



Figura 97. Gabbia di armatura di un elemento di fondazione per una linea di dissuasori statici. (2)



Figura 98. Sistema di profili in acciaio disposti a telaio che costituiscono la struttura di fondazione per quattro dissuasori passivi. (28)

In questo caso il telaio si estende in una sola direzione, si presuppone quindi che sia posizionato per bloccare un mezzo in transito in direzione "uscente dalla fotografia".

L'energia trasmessa alla fondazione è comunque molto inferiore rispetto a quella teorica dell'impatto, in quanto gran parte viene dissipata attraverso la deformazione subita dal veicolo e dalla parte fuori terra della barriera. Inoltre la decelerazione del veicolo nello scontro e la relativa energia trasferita sono a carattere transitorio e quindi caricano la struttura per pochi millisecondi. (28)

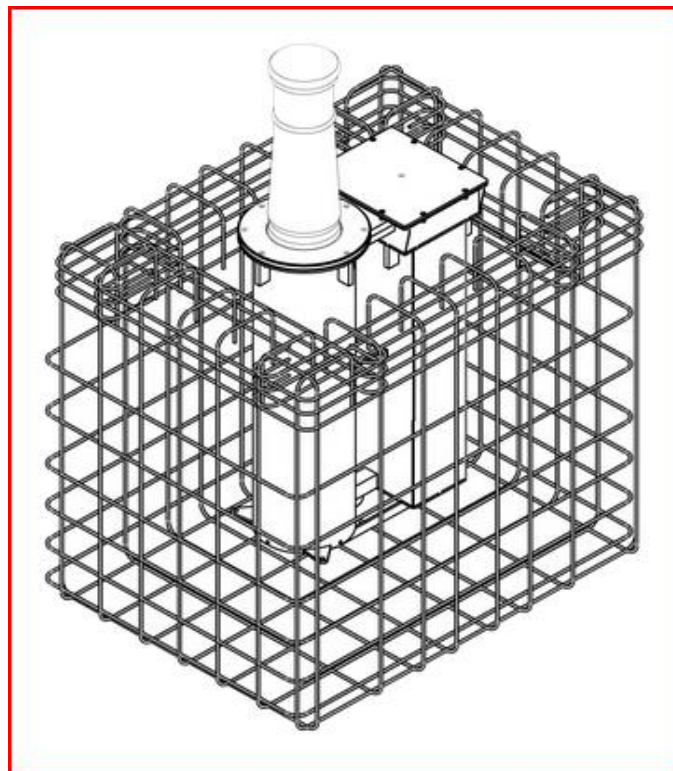


Figura 99. Dettaglio dell'armatura di un elemento di fondazione in c.a. per un bollard retrattile alimentato da un motore elettrico. (automaticbollards)

I componenti necessari alla movimentazione del sistema sono alloggiati in posizione adiacente al dissuasore, all'interno della gabbia di armatura.

Questo modello ha un diametro di 25 cm e un'altezza di 80 cm. E' in grado di resistere ad un impatto che sviluppi una forza di 30000 joule

Caso di studio: le strade di Washington

Subito dopo l'attentato dell' 11 settembre 2001, l'agenzia governativa NCPC (National Capital Planning Commission) iniziò ad elaborare uno studio volto a stendere un progetto di riqualificazione del paesaggio urbano del Monumental Core di Washington, fortemente segnato dall'introduzione affrettata ed invasiva di misure di sicurezza come barriere jersey, fioriere in cemento e postazioni di guardia, per far fronte al crescente pericolo di attacco terroristico e "all'improvvisa sensazione di vulnerabilità nella quale era sprofondata l'America". Quest'area è stata classificata ad alto rischio per via della concentrazione delle sedi delle principali attività governative, dei monumenti simbolo come il Campidoglio e la Casa Bianca.

Il piano si focalizza esclusivamente sulla sicurezza dei perimetri degli edifici sensibili, da parte dei pericoli derivanti da veicoli bomba, senza trattare le tematiche dell'irrobustimento strutturale e dei sistemi di sorveglianza.

Il Monumental Core è stato suddiviso in sei zone differenti, a seconda delle attività principali ospitate e del conseguente livello di protezione atteso, in modo da proporre le misure più adeguate alle caratteristiche di ogni singola area e creare una buona continuità architettonica tra le soluzioni adottate e lo stile delle infrastrutture presenti.

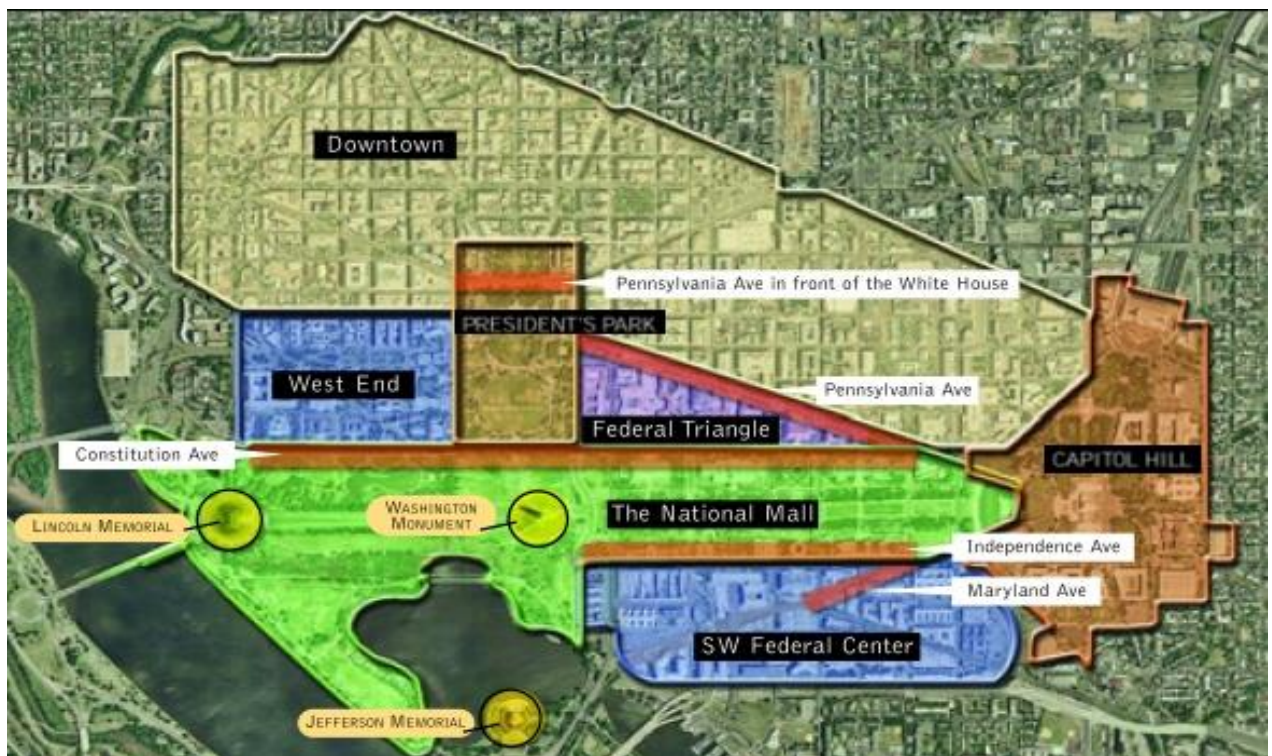


Figura 100. Vista in pianta del Monumental Core e delle aree in cui è stato suddiviso. (35)

Le più importanti da un punto di vista strategico sono il President Park, in cui è ubicata la dimora del presidente, Federal Triangle, Capitol Hill e Federal Center, in quanto sedi delle maggiori istituzioni dello stato, mentre il National Mall ospita alcuni tra i monumenti più significativi degli Stati Uniti.

Dal momento che l'intervento interessa i perimetri degli edifici, lo sforzo maggiore si concentra sulla ristrutturazione delle vie di comunicazione, proponendo uno schema di base da applicare, in cui le variabili sono rappresentate dall'ampiezza delle parti che compongono la superficie stradale.

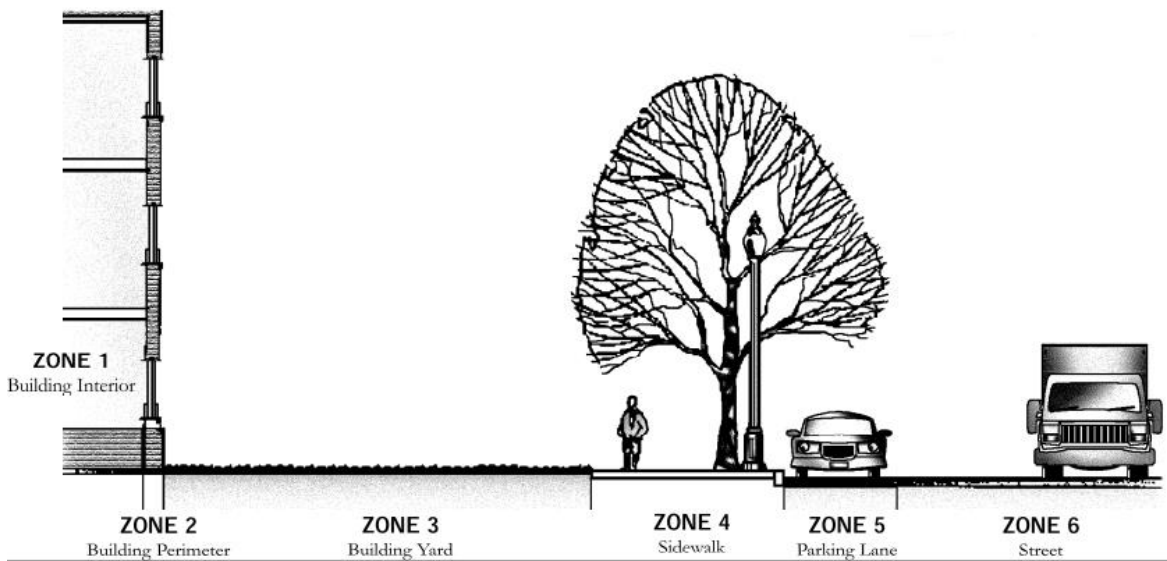


Figura 101. Schema adottato per la realizzazione di un perimetro di sicurezza intorno agli edifici integrato al contesto urbano. (36)

Le zone 3, 4, 5 costituiscono l'area di sicurezza, su cui poter intervenire posizionando gli elementi più adeguati per proteggere il perimetro e l'interno dell'edificio.

Questa configurazione, oltre che soddisfare aspetti di continuità territoriale ed estetici, è stata studiata per creare una adeguata stand off distance intorno agli edifici, misura che viene considerata come la più funzionale, dal punto di vista efficienza-costi, riguardo la protezione degli edifici contro le esplosioni, il carico dovuto all'esplosione decade in modo drastico all'allontanarsi dal centro dell'esplosione.

Per gli edifici a rischio si cerca di garantire una stand off minima compresa tra i 6 e i 15 metri, misurando dal perimetro dell'edificio fino al bordo della strada. In particolare le zone 3, il cortile, 4, il marciapiede e 5, i parcheggi, definiscono il perimetro di sicurezza intorno all'edificio.

Lo schema base per il cortile prevede una coltura a prato che si estende fino al limitare del marciapiede, posizione in cui vengono installati gli arredi urbani, tipicamente panchine, recinzioni, fontane, alberi e, in corrispondenza dei passaggi pedonali e delle entrate agli edifici, dissuasori statici e mobili per controllare l'accesso dei mezzi senza ostacolare le persone a piedi. Lo spazio occupato dal cortile, in quanto zona più vicina all'edificio, può essere considerata come una seconda linea di difesa, in cui l'arredo svolge la funzione di barriera, mentre il verde costituisce una sorta di riempimento per colmare in modo esteticamente accettabile il vuoto che si verrebbe a creare tra lo stabile e il sistema difensivo.

La prima linea di difesa viene invece approntata in corrispondenza del marciapiede, lato strada. Questa risulta la posizione più importante perché è il punto di massima distanza di stand off.

Il progetto propone di rinforzare la "curb line" con un filare di alberi interposti da arredi urbani, come lampioni di illuminazione rinforzati a prova di impatto, bidoni dei rifiuti, pensiline per autobus, aiuole in rilievo e fioriere. Si cerca di adottare elementi al contempo in grado di proteggere e di rendere più accogliente la strada.

In corrispondenza di edifici particolarmente sensibili si adotta come provvedimento estremo la rimozione della linea di parcheggi a bordo strada, sia occupandone la superficie con, per esempio, aiuole in muratura o fioriere, sia allargando le carreggiate della strada. E' così possibile allontanare ulteriormente la possibile minaccia, e scongiurare gli attentati apportati con autobomba parcheggiate e non in movimento, che risultano statisticamente la modalità principale di attacco.

Pennsylvania Avenue

Pennsylvania Avenue è la via di comunicazione più rappresentativa della città, classificata come "monumental avenue", si estende a partire dal Campidoglio, costeggiando il Federal Triangle, fino a Piazza Lafayette, di fronte all'entrata principale della Casa Bianca, collegando di fatto le due istituzioni principali del governo americano: il senato e la dimora del presidente. Tra queste due sedi troviamo invece numerosi edifici federali tra cui il palazzo dell'FBI, il dipartimento di giustizia, il Ronald Regan Trade Center e la National Gallery, tutti possibili obiettivi sensibili di un attacco terroristico.

L'analisi di Pennsylvania Avenue deve essere svolta in modo distinto tra la porzione che delimita il Federal Triangle e quella di fronte alla Casa Bianca, in quanto quest'ultima è sottoposta già dal 1995 al blocco del traffico.

Per quanto riguarda la prima sezione, ci troviamo dinnanzi ad una strada con una sede molto ampia, progettata per impersonare la grandezza e il potere degli Stati Uniti, e, non a caso, teatro della parata che segue l'insediamento del presidente.

Proprio la grandezza e il carattere monumentale rappresentano due caratteristiche in grado di garantire un buon valore base di sicurezza per gli edifici che fiancheggiano la strada: entrambe garantiscono la presenza di notevoli spazi per quanto riguarda le carreggiate e, in particolare, per i marciapiede e gli eventuali cortili, zone che rappresentano il cordone di sicurezza intorno agli edifici. Di conseguenza è relativamente semplice, avendo spazio a disposizione, assicurare una distanza di stand off in grado di soddisfare i requisiti di sicurezza attesi. Il piano prevede così di intervenire applicando lo schema stradale descritto in precedenza, cercando di concentrare le barriere in prossimità del bordo del marciapiede.

Analizziamo la configurazione proposta nel tratto di strada in corrispondenza del Federal Bureau of Investigation e il dipartimento di giustizia: la situazione originale presenta, lato dipartimento di giustizia, una ampiezza del marciapiede di 12 metri, dimensione ricorrente lungo la via, con una coppia di filari di alberi ai lati e fioriere circolari in cemento utilizzate come bollards per colmare i vuoti tra gli alberi e proteggere l'entrata al dipartimento di giustizia.

Non essendoci segnaletica apposita, è da notare che è già in vigore la misura che prevede il divieto di parcheggio a bordo strada, per evitare il pericolo di auto bomba in sosta in prossimità dell'obiettivo. La riqualificazione prevede il rinforzo delle barriere ora realizzate con le fioriere, sostituendole con arredi più vari e in grado di spezzarne la monotonia e rendere più apprezzabile il paesaggio. Si propone l'installazione di elementi rinforzati a prova di impatto, come lampioni, bidoni raccolta rifiuti, pensiline e aiuole in rilievo in prossimità degli alberi.

Non si richiede l'estensione della distanza di stand off in quanto i 12 metri già presenti soddisfano i parametri proposti dalla normativa, che sono compresi tra i 6 e i 12 metri.



Figura 102. Situazione esistente: si può notare una fitta linea di barriere realizzate mediante fioriere in cemento posizionate lungo il bordo del marciapiede. Lavorano per gravità e sono prive di un sistema di fondazione, sono un sistema molto veloce da installare e possono rappresentare un'alternativa architettonicamente accettabile alle barriere jersey.



Figura 103. Schema di intervento: si prevede l'alternanza di elementi di arredo rinforzati sia per accrescere l'efficacia della barriera sia per migliorare l'aspetto della strada. (35)

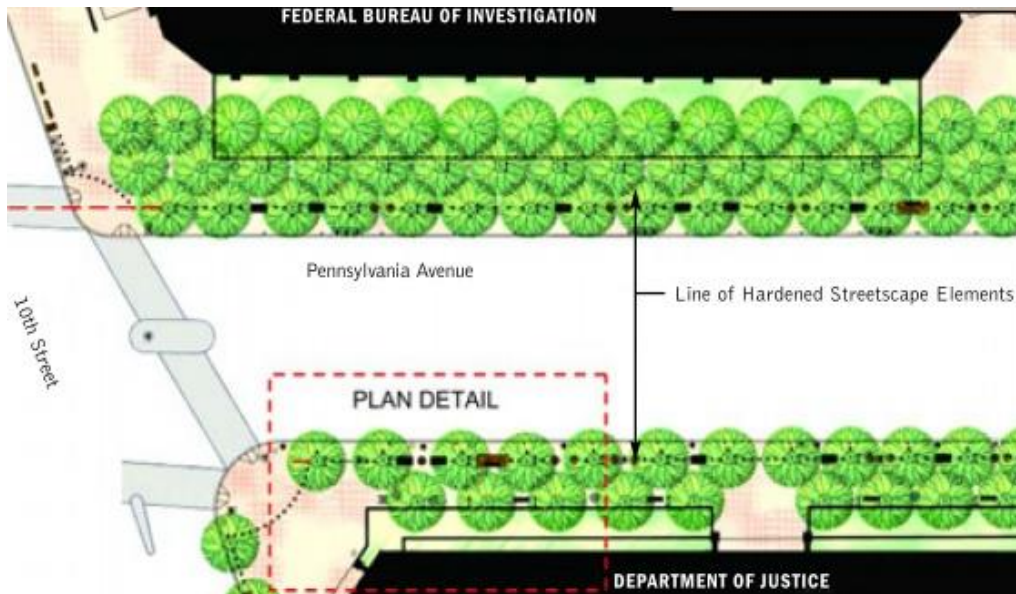


Figura 104. Vista in pianta dell'intersezione tra Pennsylvania Avenue e la decima strada, in corrispondenza del dipartimento di giustizia e il palazzo dell'FBI. Si nota come il lato di marciapiede dalla parte dell'FBI sia anomalo rispetto al resto della via, in quanto più largo e dotato di tre filari di alberi. (35)

L'obiettivo dell'intervento, oltre che un miglioramento dell'estetica e della sicurezza, si propone di rendere al massimo funzionale l'ambiente urbano, predisponendo le barriere in modo da non intralciare il naturale flusso dei pedoni. A questo proposito si pone l'attenzione sull'entrata del dipartimento di giustizia, in principio schermata da due "braccia" di vasi, che limitano il naturale approccio al palazzo agli utenti, impedendone l'accesso diretto.



Figura 105. Portone di entrata al dipartimento di giustizia, protetto da una serie di fioriere con la funzione di bollards che ne impediscono l'accesso frontale, obbligando gli utenti ad un avvicinamento laterale. Questo provvedimento è stato attuato per evitare che un automezzo riesca a forzare le barrire e possa introdursi all'interno dell'edificio (anche solo se nell'ingresso) sfruttando la grande apertura offerta dall'entrata principale.

La riqualificazione prevede dunque la presenza di una doppia linea di dissuasori: una in corrispondenza del bordo del marciapiede, di cui segue il perimetro, e l'altra leggermente arretrata che preserva la continuità della barriera realizzata in asse con gli alberi.

In questo modo si ottiene non solo un miglioramento della vivibilità dell'area, in quanto si lascia libero il passaggio vicino all'edificio, permettendone l'accesso diretto in posizione frontale rispetto all'entrata, ma anche un aumento del livello di protezione in quanto le difese sono più lontane dall'edificio, garantendo di conseguenza una maggiore stand off distance.

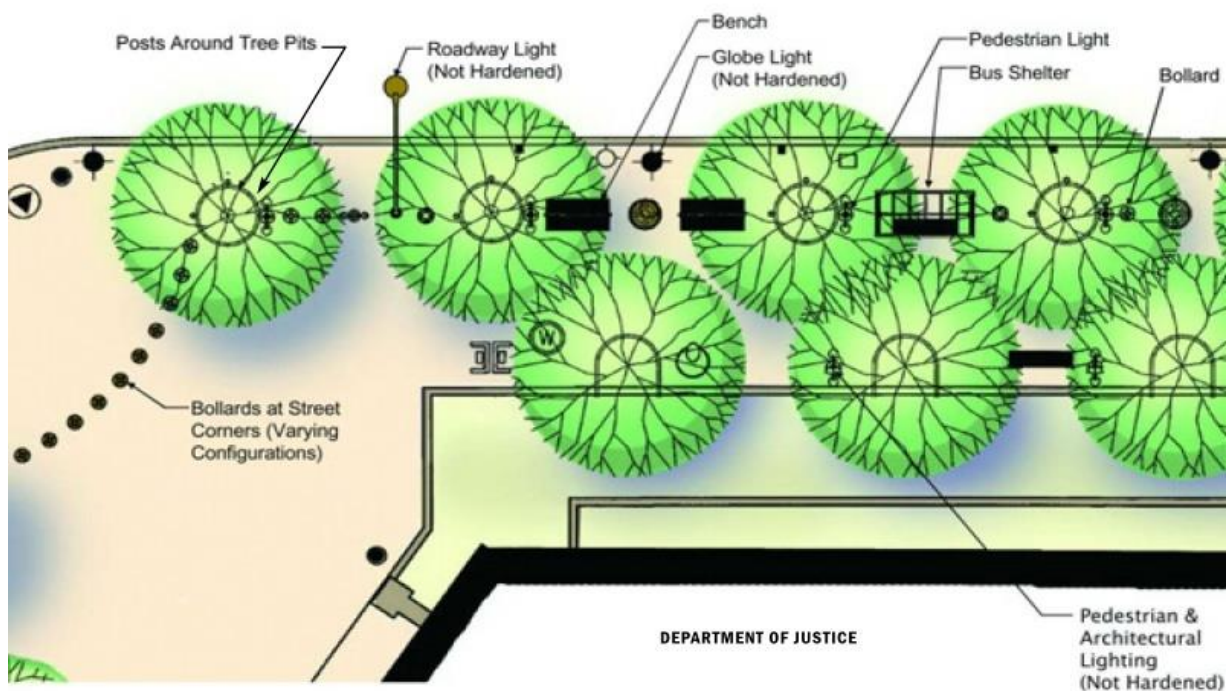


Figura 106. Vista in pianta dell'angolo tra Pennsylvania Avenue e la 10th Strada, (35) si nota la continuità della linea difensiva anche nell'angolo, data dalla continuazione della "linea degli alberi" in collaborazione a bollards posti sul limitare del marciapiede in corrispondenza dell'angolo.

Per quanto riguarda invece il lato strada di fronte all'edificio dell'FBI si ha una configurazione insolita per Pennsylvania avenue: il marciapiede ha una larghezza di circa venti metri e presenta tre filari di alberi sfalsati in modo da colmare i vuoti. Questa configurazione rappresenta di per se già un'ottimo sistema di difesa, e l'intervento si limiterebbe ad adottare gli stessi elementi già menzionati per il lato opposto della strada, in modo da uniformarne l'aspetto.



Figura 107. Vista dell'entrata principale all'edificio FBI, anche in questo caso è presente una barriera di vasi aggiuntiva intorno all'ingresso. L'intervento prevede l'applicazione dello schema tipo: creazione di un cortile verde intorno all'edificio, in modo da sostituire i vasi in corrispondenza dell'ingresso con una fila di bollards, e il rinforzo della linea perimetrale del marciapiede, che, la funzione ospitata dal palazzo (l'attentato ad Oklahoma City è stato contro un edificio FBI), prevede il divieto assoluto di sosta a bordo strada.

Nella zona antistante la Casa Bianca, i lavori di riqualificazione sono stati già realizzati ed ultimati nel 2005. Anche in questo caso si è trattato di “restyling”, ovvero la sostituzione delle barriere che sono state installate nel 1995 a seguito della chiusura al traffico dell'area. In principio per bloccare gli accessi agli incroci, in corrispondenza della 17° e 15° strada, erano stati predisposti sistemi mobili quali barriere jersey e le già menzionate fioriere circolari, sostituite ora da una doppia fila di bollards retrattili, che permettono l'accesso ai mezzi di sicurezza. Il blocco del traffico è stato necessario per implementare la sicurezza della Casa Bianca, eliminando il rischio di un possibile sfondamento e intrusione della recinzione intorno al Parco del Presidente, nella zona in cui l'edificio è più vicina ai confini del suo parco e in corrispondenza dell'ingresso principale.

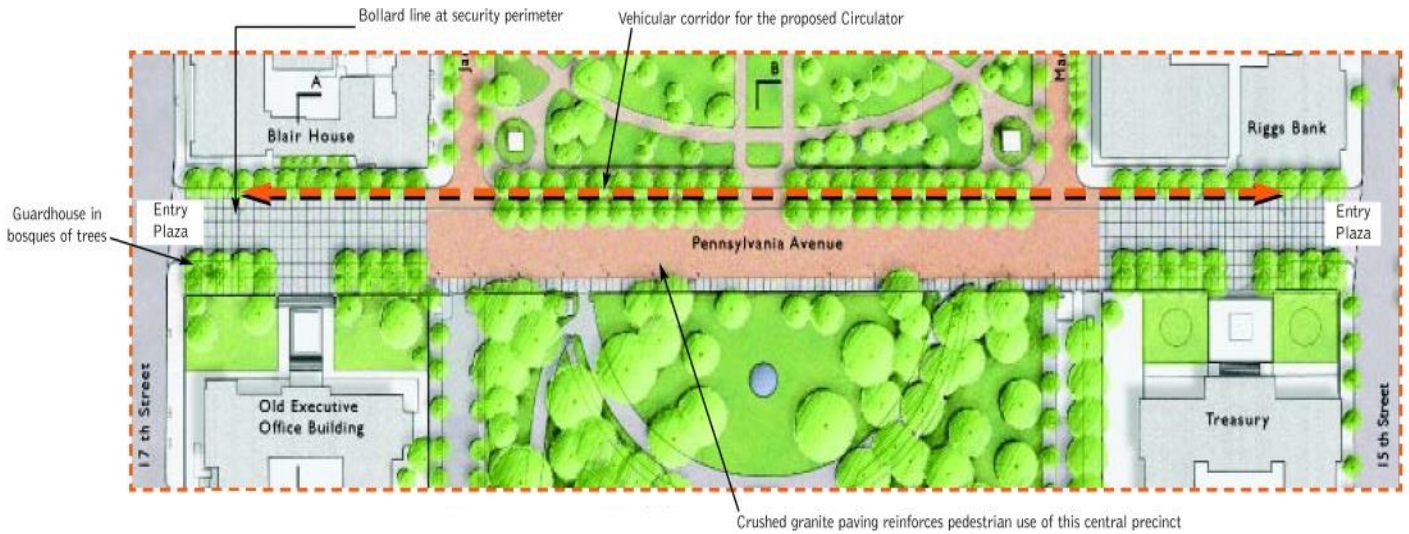


Figura 108. Vista in pianta dell'intervento realizzato per bloccare gli accessi a qualsiasi tipo di veicolo di fronte alla Casa Bianca. (35)

A Destra, all'incrocio con la 15°, e a sinistra, all'incrocio con la 17°, sono stati posizionati i gate di accesso. La linea rossa tratteggiata rappresenta il percorso che in futuro potrebbe essere seguito da una linea di mezzi pubblici su rotaia. Questo progetto è stato pensato per ovviare ai disagi causati dal blocco della strada, che ha provocato il troncamento di una delle principali vie di comunicazione del centro della città.



Figura 109. Ingresso lato 17° strada, si possono notare le due file di bollards e la posizione di guardia. I due edifici laterali sono la Blair House, in cui vengono ospitate le delegazioni straniere, e l'Executive Office Building.

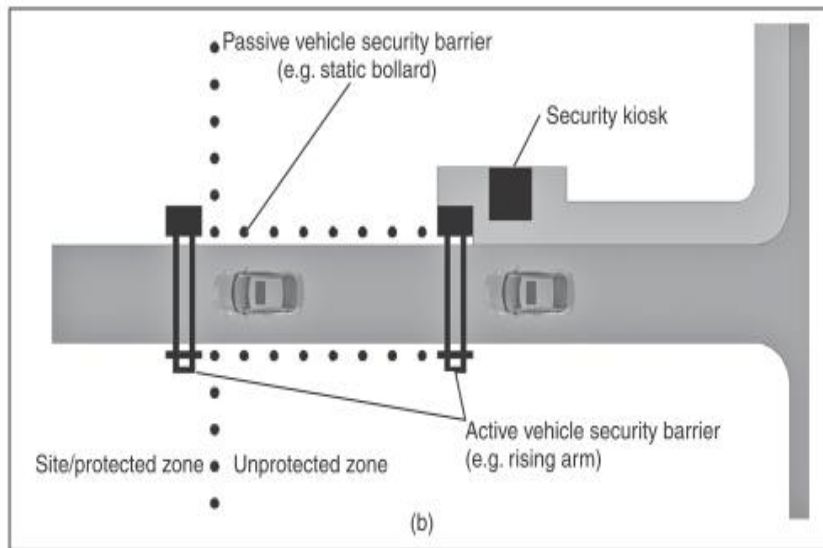


Figura 110. Schema doppia linea di accesso. (2)

Le nuove barriere seguono lo schema della doppia linea, realizzata con due filari di bollards retrattili che si estendono per tutta la larghezza della strada. In corrispondenza della prima linea troviamo una postazione di guardia per il controllo delle credenziali dei mezzi autorizzati a varcare la barriera.

La seconda linea viene abbassata solo a seguito della chiusura della prima, in modo da non avere mai il passaggio aperto per evitare una eventuale intrusione forzata.

Come si può notare in definitiva la fisionomia di Pennsylvania Avenue non è stata sottoposta a stravolgimenti radicali, eccezion fatta per il tratto di fronte alla Casa Bianca, che più che a una modifica architettonica, bloccando il traffico, è stata sottoposta a una modifica funzionale. La sede stradale, i marciapiede e i tipici filari di alberi sono stati mantenuti, e integrati con sistemi che non ne modificassero il carattere che da sempre contraddistingue questa zona. Il provvedimento ha inoltre di fatto tagliato in due i trasporti tra la porzione sud di Down Town e allontanato il West End dal Federal Triangle, provocando ripercussioni rilevanti sul traffico dell'intera città, incentivando così una serie di studi di fattibilità per la realizzazione di un tunnel al di sotto del manto stradale in grado di ripristinare il collegamento diretto tra le aree ai fianchi di Piazza Lafayette e del Parco del Presidente.

Federal Triangle

Il Federal Triangle è un quartiere che si estende a partire dal lato sud di Pennsylvania Avenue tra la Casa Bianca e il Campidoglio, costruito negli anni '30, rappresenta uno dei più grandi progetti realizzati dal governo americano per ospitare le sedi delle sue principali istituzioni. I lavori di riqualificazione sono attualmente in corso di svolgimento, e tendono a rispecchiare le linee già proposte in precedenza. Vediamo ad esempio i provvedimenti attuati lungo il perimetro dell'edificio del dipartimento di commercio, che offre spunti interessanti in quanto si possono osservare anche delle misure temporanee utilizzate per proteggere lo stabile durante lo svolgimento dei lavori.



Figura 111. Vista del perimetro dell'edificio del dipartimento del commercio, situato nella 14° strada, precedente all'inizio dei lavori. (36)

La condizione originale presenta già una disposizione molto simile allo schema di base proposto dal progetto di riqualificazione, a conferma del fatto che si vogliono mantenere i connotati fondamentali che caratterizzano l'area. Si può infatti notare il cortile coltivato a verde, il marciapiede e una linea di aiuole munite di alberi sull'interfaccia con la carreggiata. A giudicare dalle immagini, in questo caso, il soddisfacimento dei requisiti di sicurezza si sposa in pieno con l'occasione di poter sistemare l'area anche dal punto di vista estetico, viste le condizioni della pavimentazione e delle aiuole laterali. Lungo il perimetro non sono presenti sistemi continui di barriere, eccetto in corrispondenza dell'ingresso, dove sono state posizionate delle fioriere



Figura 112. Particolare dell'ingresso al dipartimento del commercio (35)

per evitare che un autoveicolo possa penetrare nell'edificio sfruttando l'ampia apertura di ingresso. La mancanza di continuità delle barriere, anche realizzate con sistemi provvisori, indica il fatto che l'edificio, all'epoca della fotografia, non era considerato ad alto rischio attentato, tuttavia ad oggi, mentre sono in corso i lavori, visto anche il layout del cantiere, è stato sicuramente innalzato il livello di sicurezza atteso.



Figura 113. Facciata del dipartimento del commercio che si affaccia sulla 14° strada. Si nota la recinzione del cantiere intorno all'edificio.

L'immagine raffigura una fase dell'intervento in programma, in cui si sta operando sul cortile adiacente il perimetro dell'edificio. Il cantiere, per motivi di sicurezza ovviamente non legati ad attacchi terroristici, è cintato da una recinzione metallica, mentre si può invece notare la linea di fioriere che segue tutto il perimetro dell'edificio, che, rispetto all'immagine precedente l'inizio dei lavori, è spostata più in vicinanza rispetto al bordo del marciapiede e soprattutto è continua lungo tutto il perimetro.

Vista il passo fitto dei vasi e la loro stazza appare evidente che il loro scopo sia quello di barriera provvisoria necessaria per tenere lontani mezzi ostili e garantire un minimo di distanza di stand off, in attesa che i lavori siano completati.



Figura 114. Rappresentazione di come verrà trasformata la 14° strada. (35)

Come già detto e come si vede dal progetto, il paesaggio urbano non verrà stravolto, ma saranno potenziati gli elementi presenti. Le aiuole saranno realizzate in rilievo rispetto al marciapiede, risultando al contempo più gradevoli alla vista e più difficilmente superabili, sul bordo della carreggiata verranno posizionate staccionate e paletti dissuasori in corrispondenza dei passaggi pedonali in modo da bloccare l'accesso agli autoveicoli, senza danneggiare le persone a piedi.

Nonostante si tratti di un quartiere diverso, e soprattutto una via diversa e meno importante di Pennsylvania Avenue, anche la 14° strada verrà adeguata con i medesimi criteri architettonici, in modo da perseguire l'obiettivo di creare un unico contesto dotato di continuità del paesaggio all'interno del Monumental Core.

National Mall

È molto interessante anche l'intervento eseguito intorno al Monumento a Washington, un obelisco in marmo eretto a sud del Parco del Presidente, al centro del National Mall, sicuramente una delle opere più conosciute e in vista degli Stati Uniti e di conseguenza ad alto rischio attentato.



Figura 115. Particolare di una muraglia di barriere jersey a difesa del Monumento a Washington. (36)

Inizialmente, dopo l'11 settembre, venne approntato un sistema di difese realizzato mediante un cordone perimetrale di barriere jersey, non solo per ostacolare eventuali veicoli, ma anche per impedire l'ingresso a persone non autorizzate. Questo sistema, per quanto molto efficace, non si coniugava col ruolo di attrazione turistica giocato dal monumento, in quanto rispecchiava in pieno il sentimento di paura e costante minaccia che gravava sull'America subito dopo l'attentato alle Torri Gemelle. Ad oggi si è cercato di realizzare un perimetro di sicurezza assolutamente discreto ed integrato con l'ambiente del parco: è stato realizzato un cordone circolare di circa 60 metri di raggio, giocando sui dislivelli del terreno.



Figura 116. Percorso di accesso all'area "sicura" del monumento a Washington, la recinzione è presente perché al momento della foto erano in corso lavori di manutenzione. Si nota la presenza di una coppia di bollards retrattili per posti in corrispondenza sentiero di accesso.

Dalla foto si notano i diversi livelli presenti, il piano su cui si posa il monumento è sopraelevato rispetto al resto dell'area, che non è lineare, ma effettua uno scalino di circa un metro e trenta impedire l'accesso ai veicoli. Vi sono comunque degli accessi per i mezzi di servizio (come illustrato nella foto), ostruiti da bollards retrattili.



Figura 117. Vista dall'alto del Monumento a Washington, si nota l'articolazione dei percorsi che portano all'obelisco. L'ellisse più ampia è quella che segna il gradone utilizzato come barriera. La scelta di elementi concentrici è collegata con il simbolismo che ruota intorno all'obelisco.

Senza dubbio è stato un progetto molto riuscito perché ha fornito un ottimo livello di protezione senza causare un forte impatto visivo, al punto che in loco quasi non se ne avverte la presenza .



Figura 118. Vista dalla base del monumento in direzione nord. Si scorge il sentiero presso il quale è stato realizzato il "gradino", ma non se ne nota assolutamente la presenza, dando l'impressione di un terreno gradualmente scosceso

Conclusioni

Lo studio dei meccanismi delle esplosioni, del loro effetto nei riguardi degli edifici e delle modalità con cui vengono realizzati gli attacchi terroristici hanno messo in luce una serie di concetti fondamentali da tenere in considerazione se si vogliono comprendere le motivazioni che hanno portato a ideare determinate soluzioni per poter ottenere un adeguato livello di protezione per gli edifici:

- Innanzi tutto con la parola protezione, non si esprime un concetto assoluto, ma la si considera sempre come risultato dell'interazione tra i costi per le misure di sicurezza, i costi da sopportare a seguito di un'eventuale perdita della struttura e il rischio atteso. In particolare quest'ultimo è quello che pone l'incipit e si impone con maggior peso sulle scelte in materia di sicurezza.
- Minimizzare la formazione di detriti: tutte le soluzioni proposte dalle linee guida e tutti i requisiti imposti dalle normative hanno lo scopo di salvaguardare la vita degli utenti. Per questo motivo si presta molto l'attenzione nei riguardi dei materiali e dei componenti utilizzati, in quanto è emerso che la maggior parte delle vittime sono provocate non tanto dalla pressione dell'onda di blast, ma da veri e propri proiettili, generati prevalentemente dalla rottura delle partizioni, dei vetri, dell'arredo e delle decorazioni esterne sulle facciate. Negli edifici a rischio si sconsiglia per esempio l'utilizzo di muri esterni in mattoni o di vetri monolitici per le finestre, due elementi che non sopportano grandi sollecitazioni e a rottura sviluppano una grande quantità di frammenti letali per le persone.

Questa problematica è molto rilevante soprattutto negli edifici esistenti, costruiti quando non si aveva ancora una adeguata sensibilità su questo argomento, perciò sono stati studiati sistemi low cost per trattare le superfici con prodotti in grado di evitare lo spargimento dei detriti, come ad esempio le membrane adesive da incollare sui vetri.

- Stabilire un perimetro sicuro: si cerca di mitigare l'effetto dell'esplosione cercando di tenere l'ordigno il più lontano possibile dal bersaglio, in quanto la potenza dell'onda d'urto decade drasticamente man mano che aumenta la distanza dall'ordigno. L'estensione del perimetro di sicurezza dovrebbe costituire la stand-off distance, ovvero la distanza minima dall'ipotetico bersaglio alla quale può esplodere un dispositivo.
- Le statistiche hanno rilevato che la maggior parte degli attentati in ambiente urbano vengono effettuati mediante l'utilizzo di auto bomba per via dei grandi quantitativi di esplosivo trasportabili e per la versatilità del mezzo impiegato. Per questo motivo i provvedimenti adottati tendono a costituire i perimetri impiegando sistemi specifici per opporsi agli automezzi, permettendo un massimo grado di permeabilità nei riguardi dei pedoni, salvo in casi particolari. Tipicamente si considera come distanza di stand off quella che intercorre tra la facciata dell'edificio e il bordo laterale della carreggiata della strada, includendo all'interno il marciapiede e l'eventuale cortile.

- Prevenire il collasso progressivo: si cerca di modellare la struttura in modo da garantirgli un buon livello di ridondanza, ovvero la capacità di ridistribuire i carichi a seguito della perdita di uno o più elementi strutturali.
E' possibile inoltre provvedere al rinforzo di ogni singolo elemento in modo da evitarne il più possibile il danneggiamento, utilizzando sistemi di armatura aggiuntivi o appositi sistemi di rivestimento. Questi ultimi accorgimenti hanno comunque un'azione limitata, in quanto al crescere del requisito di protezione si va sempre più verso strutture onerose con sezioni grandi, pesantemente armate e partizioni perimetrali con aperture piccole e poco diffuse. Inoltre non bisogna sottovalutare, oltre ai costi, la complessità della realizzazione e della progettazione di questi sistemi. Per questo motivo è preferibile concentrare le risorse per ottenere la maggiore stand off distance possibile.
- E' molto importante l'integrazione dei sistemi di sicurezza con il contesto in cui si collocano, per questo motivo trovano grandi fortune gli elementi di arredo urbano, come aiuole, lampioni e panchine opportunamente rinforzati, in quanto possono garantire un certo livello estetico e funzionale, ma soprattutto non appaiono come sistemi di difesa agli occhi della popolazione. Questo aspetto è fondamentale, in quanto i connotati dell'ambiente condizionano enormemente la mente delle persone: un individuo inserito in un'area caratterizzata dalla presenza di dispositivi con la sola funzione difensiva, come barriere in cemento, recinzioni o postazioni di guardia, finirebbe per percepire che si trova in un ambiente potenzialmente ostile, vedendo i sistemi di sicurezza come fattori che ricordano la minaccia incombente causandogli così uno stato di disagio mentale.
L'agenzia governativa che si è occupata del progetto di riqualificazione del Monumental Core di Washington ha motivato lo sviluppo del suo progetto sostenendo che i sistemi di sicurezza non integrati costituiscono una minaccia per i fondamenti della democrazia.

Indice delle figure

Figura 1. Time history della pressione generata da un'esplosione.(3)	10
Figura 2. Idealizzazione dell'andamento nel tempo della pressione,	13
Figura 3. Forme.....	14
Figura 4. Evoluzione delle geometrie.....	15
Figura 5. Confronto tra la pressione diretta (tratteggiata) e quella riflessa.	15
Figura 6. Relazione tra l'angolo di incidenza dell'onda e i coefficienti di riflessione. (1)	16
Figura 7. Rappresentazione schematica di come si articola l'onda d'urto a seguito di un'esplosione. (1)	16
Figura 8. Cane, casa ed albero colpiti dall'onda di un'esplosione.	17
Figura 9. Effetto della pressione dell'onda di blast su una struttura.....	18
Figura 10. Diverse modalità di danno provocato da un ordigno di piccole dimensioni, tipicamente trasportato a mano all'interno dell'edificio.....	20
Figura 11. Schema di una struttura elastica a un singolo grado di libertà sollecitata da un'esplosione. (2)	21
Figura 12. Time history approssimata della forza impressa da un'esplosione (2).....	21
Figura 13. Carico quasi statico (2).....	22
Figura 14. Carico impulsivo (2)	22
Figura 15. Carico dinamico (2).....	23
Figura 16. Rappresentazione idealizzata della funzione di carico e di resistenza.(2).....	23
Figura 17. Rappresentazione della risposta quasi statica (I), impulsiva (II) e dinamica (III). (2)..	24
Figura 18. Grafico pressione-impulso, che definisce le condizioni per i quali occorrono i danni. (2).....	25
Figura 19. Curve di danno relative ad un edificio con i tamponamenti in muratura. (6).....	26
Figura 20. Curva di resistenza-flessione per elementi in c.a.	27
Figura 21. Approssimazione della funzione di resistenza per un elemento in c.a.....	27
Figura 22. Fattori di incremento dinamico per elementi strutturali tratti dalla normativa inglese.	28
Figura 23. Resistenze dinamiche di progetto per elementi strutturali in acciaio tratti dalla normativa inglese.	28
Figura 24. Schematizzazione della deformazione di una trave, piastra o pannello. (2).....	29
Figura 25. Limiti di deformazione tratti dalla normativa inglese.....	29
Figura 26. Schematizzazione della deformazione di un telaio. (2)	29
Figura 27. Curva sforzo-deformazione dell'acciaio.....	30
Figura 28. Nodo strutturale di connessione tra trave e pilastro.	30
Figura 29. Sezione di un pilastro in acciaio munito di rivestimento in c.a. dello spessore di 4". (9).....	31
Figura 30. Fattori di incremento dinamico per elementi strutturali tratti dalla normativa inglese.	31
Figura 31. Resistenze dinamiche di progetto per elementi strutturali in c.a. tratti dalla normativa inglese.	32
Figura 32. Limiti di deformazione tratti dalla normativa inglese.....	32
Figura 33. Diagramma sforzo-deformazione per un elemento in c.a.	33
Figura 34. Sezioni trasversali di due travi in c.a. (2).....	33
Figura 35. "laced reinforcement". (11)	34
Figura 36. Tipologia comune di rinforzo per un nodo trave-pilastro (a). Sistema di rinforzo maggiorato(b). (9).....	35
Figura 37. Sezione di una "steel racket" posta intorno ad una colonna in c.a. (9).....	36

Figura 38. Boucher Street, Belfast. (2)	37
Figura 39. A sinistra: funzione di resistenza per una muratura. Figura 40. A destra: schema di risposta di una muratura vincolata alla base. (2)	38
Figura 41. In alto: modalità di stesura del rivestimento polimerico. Figura 42. In basso: sistema di ancoraggio dei teli geotessili. (9)	39
Figura 43. Schema del danno massimo consentito dalla normativa inglese per un edificio, al fine di prevenirne il collasso progressivo. (12)	40
Figura 44. Schematizzazione dei possibili meccanismi di resistenza che si generano a seguito del crollo di una colonna. (2).....	41
Figura 45. Spaccato dell’edificio per mettere in risalto i danni provocati dall’esplosione.	43
Figura 46. Facciata dell’edificio investita direttamente dall’esplosione.....	43
Figura 47. Pianta del complesso di edifici circostanti al Murrah Buildig. (16).....	44
Figura 48. Schema di crollo. (14)	45
Figura 49. Ronan Point. (14).....	46
Figura 50. Chamber of Shipping, Londra, 10 aprile 1992. (2).....	47
Figura 51. Kansalis House, Londra, 24 aprile 1993. (2)	47
Figura 52. Classificazione dei danni secondo la normativa inglese. (21)	52
Figura 53. Rottura di diverse tipologie di vetri. (2).....	53
Figura 54. Rottura vetro monolitico. (2)	54
Figura 55. Rottura vetro temperato.(2)	54
Figura 56. Rottura vetro stratificato. (18)	55
Figura 57. Confronto tra modalità di rottura di vetri float, temperati e stratificati. (17).....	56
Figura 58. Sezione di una chiusura realizzata con un vetro stratificato. (17).....	56
Figura 59. Effetto di un’esplosione.	56
Figura 60. Diverse applicazioni delle pellicole adesive: (17)	57
Figura 61: Diverse tipologie di vetro e sistemi di rinforzo. (17)	58
Figura 62. Schema ideale di come la facciata continua deve essere vincolata alla struttura principale dell’edificio. (17).....	60
Figura 63.A sinistra: sistema di fissaggio puntuale per una facciata continua.....	60
Figura 64.A destra: pop out di un vetro stratificato dalla sede del telaio.....	60
Figura 65. A destra: disegno proposto dalla U.S. air force design guide per schematizzare il concetto di stand off zone.(3) Figura 66. A sinistra: U.S. Courthouse, Seattle.....	62
Figura 67. Grafico realizzato dall’U.S. air force per fornire una linea guida sulle stand off distance da adottare in base alla minaccia dalla quale si intende difendere un edificio.(3)	62
Figura 68. Parametri nel progetto delle chicanes. (2).....	65
Figura 69. Barriera a linea singola. (2).....	66
Figura 70. Barriera a doppia linea. (2).....	66
Figura 71. Barriera a doppia linea con rifiuto finale. (2)	67
Figura 72. Sequenze di posa di una barriera di Hesco bastions. Fonte Hesco.	68
Figura 73. Accesso alla base di Nassiriya.....	68
Figura 74. Vista della Base Maestrale dopo l’attacco. (Sky).....	69
Figura 75. Vista del perimetro difensivo realizzato mediante hesco bastions. (Rainews).....	70
Figura 76. Vista dalla strada principale della Base Maestrale. (La Stampa).....	70
Figura 77. Protezione dell’ accesso.....	71
Figura 78. Esempi di sistemi di sicurezza passivi:	72
Figura 79. Esempi di sistemi attivi:	73
Figura 80. American Indian Museum, Washington. (31)	75
Figura 81. Ferederal Courthouse, Minneapolis. (31)	76
Figura 82. Hennepin County Courthouse, Minneapolis. (31).....	76
Figura 83. Wall Street Financial District, NY.	76

Figura 84. A sinistra: Columbia University, Broadway, Upper West Side, NY.	77
Figura 85. A destra: Downtown Brooklyn Courthouse, NY.	77
Figura 86. A sinistra: New York City Hall, NY. (31)	78
Figura 87. A destra: New York City Hall Park, NY. (31).....	78
Figura 88. Vista in sezione di una Tiger Trap: (35).....	79
Figura 89. Schema di funzionamento di una piattaforma girevole ad alimentazione elettrica e munita di quattro dissuasori. (28)	80
Figura 90. Vista ed esempio applicativo di una piattaforma girevole munita di bollards. (28)...	80
Figura 91. Sequenza di un crash test eseguito su una piattaforma girevole,.....	81
Figura 92. A destra: sezione del sistema di guide di un dissuasore retrattile ad azione manuale.	81
Figura 93. A sinistra: vista del sistema di sollevamento di una plate barrier posizionata in un checkpoint all'ingresso di un'area protetta.	81
Figura 94. A sinistra: Campidoglio, Washington. (28).....	82
Figura 95. A destra: U.S. Federal Buildig, Washington. (29).....	82
Figura 96. Energia di impatto. (28)	82
Figura 97. Gabbia di armatura di un elemento di fondazione per una linea di dissuasori statici. (2).....	83
Figura 98. Sistema di profili in acciaio disposti a telaio che costituiscono la struttura di fondazione per quattro dissuasori passivi. (28).....	84
Figura 99. Dettaglio dell'armatura di un elemento di fondazione in c.a. per un bollard retrattile alimentato da un motore elettrico. (automaticbollards).....	84
Figura 100. Vista in pianta del Monumental Core e delle aree in cui è stato suddiviso. (35)	85
Figura 101. Schema adottato per la realizzazione di un perimetro di sicurezza intorno agli edifici integrato al contesto urbano. (36)	86
Figura 102. Situazione esistente: si può notare una fitta linea di barriere realizzate mediante fioriere in cemento posizionate lungo il bordo del marciapiede.....	88
Figura 103. Schema di intervento:.....	88
Figura 104. Vista in pianta dell'intersezione tra Pennsylvania Avenue e la decima strada,	89
Figura 105. Portone di entrata al dipartimento di giustizia,	89
Figura 106. Vista in pianta dell'angolo tra Pennsylvania Avenue e la 10th Strada, (35).....	90
Figura 107. Vista dell'entrata principale all'edificio FBI,.....	91
Figura 108. Vista in pianta dell'intervento realizzato per bloccare gli accessi a qualsiasi tipo di veicolo di fronte alla Casa Bianca. (35)	92
Figura 109. Ingresso lato 17° strada,	92
Figura 110. Schema doppia linea di accesso. (2)	93
Figura 111. Vista del perimetro dell'edificio del dipartimento del commercio, situato nella 14° strada, precedente all'inizio dei lavori. (36).....	94
Figura 112. Particolare dell'ingresso al dipartimento del commercio (35).....	95
Figura 113. Facciata del dipartimento del commercio che si affaccia sulla 14° strada. Si nota la recinzione del cantiere intorno all'edificio.....	95
Figura 114. Rappresentazione di come verrà trasformata la 14° strada. (35)	96
Figura 115. Particolare di una muraglia di barriere jersey a difesa del Monumento a Washington. (36)	97
Figura 116. Percorso di accesso all'area "sicura" del monumento a Washington,	97
Figura 117. Vista dall'alto del Monumento a Washington,.....	98
Figura 118. Vista dalla base del monumento in direzione nord.....	98

Bibliografia

- 1) Alessandro D'Andrea: "Calcoli di dinamica dell'esplosione", 2011.
- 2) David Cormie: "Blast effect on buildings"; ICE publishing, 2009.
- 3) FEMA: "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings"; Federal emergency management agency, www.fema.gov, 2003.
- 4) Rankine: "On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance"; Philosophical Transactions of the Royal Society, 1870.
- 5) Smith e Hetherington: "Blast and ballistic loading of structures"; Butterworth-Heinemann, 1994.
- 6) Baker, Cox , Westine, Kulesz e Strehlow: "Explosion Hazards and Evaluation"; Elsevier, London, 1983.
- 7) US Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency: "Structures to resist the effects of accidental explosions"; US Department of Defense, 2008.
- 8) British Standards Institution: "Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings"; BSI, 2005.
- 9) R. Smilowitz: "WBDG: design buildings to resist explosive threats"; National institute of buildings science, 2011.
- 10) British Standards Institution: "Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings". BSI, 2004.
- 11) S.C. Woodson: "Lacing versus strirrup – an experimental study of shear reinforcement in blast resistant structures"; U.S. Army corps of engineers, 1992.
- 12) Department of Communities and Local Government: "Building Regulations 2000. Approved Document A — Structure. Part A3 — Disproportionate Collapse"; DCLG, 2004.
- 13) US Department of Defense: "Design of buildings to resist progressive collapse"; Department of Defense, 2008.

- 14) L. Giuliani: "Il ruolo della continuità nei collassi progressivi: comportamento dell'edificio federale Alfred P. Murrah di Oklahoma City", tesi di dottorato; Università degli studi La Sapienza, 2004.
- 15) R. Hamburger, W. Baker, J. Barnett, J. Milke, H. Nelson: "World Trade Center Building Performance Study"; www.fema.gov, 2009.
- 16) ASCE: "The Oklahoma City Bombing: Improving building performance through multi-hazard mitigation", Report FEMA 277; FEMA Mitigation Directorate, Reston Virginia, 1996.
- 17) FEMA: "Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks"; Federal emergency management agency, www.fema.gov, 2003.
- 18) Security Facilities Executive Special Services Group: "Glazing Hazard Guide"; Cabinet Office, London, 1997.
- 19) D.C. Smith: "Proceedings of the 12th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures"; New Orleans, 2007.
- 20) D.C. Smith: "Quantification of glazing hazards from blast"; Proceedings of the 29th Department of Defense Explosives Safety Seminar, New Orleans, 2000.
- 21) US General Services Administration (GSA): "Standard test method for glazing and glazing systems subject to airblast loadings"; GSA-TS01-2003, General Services Administration, 2003.
- 22) British Standards Institution: "Specification for vehicle security barriers"; BSI, 2009.
- 23) American Society for Testing and Materials: "Standard test method for vehicle crash testing of perimeter barriers"; ASTM F 2656-07, ASTM International, 2007.
- 24) CEN Workshop 45: "Vehicle security barrier systems — performance

- requirements, test methods and guidance on application”; BSI, 2009.
- 25) Camilla Bength: “Bolt fixing in toughened glass”; Lund University, 2005.
- 26) “How bollards can save lives, prevent injuries and relieve traffic congestion in N.Y. City”; transalt.org, 2007.
- 27) C. Oakes : “WBDG: the bollards crash and attack resistant models”; National institute of buildings science, 2013.
- 28) E. Hinman: “WBDG: blast safety of the building envelope”; National institute of buildings science, 2011.
- 29) “WBDG: effective site security design”; National institute of buildings science, 2010.
- 30) “WBDG: landscape architecture and the site security design process”; National institute of buildings science, 2009.
- 31) J.L.Smith: “WBDG: glazing hazard mitigation”; National institute of buildings science, 2010.
- 32) D.Watch: “WBDG: design retrofitting existing buildings to resist explosive threats”; National institute of buildings science, 2011.
- 33) U.S. Army Corps of Engineers :“Standard Test Method for Vehicle Crash Testing of Perimeter Barriers”; ASTM, 2007.
- 34) C. Oakes : “WBDG: the bollards non crash and non attack resistant models”; National institute of buildings science, 2012.
- 35) Interagency security task force: “The National Capital Urban Design and Security Plan”; National Capital Planning Commission, 2004.

- 36) Interagency security task force: "Designing for Security in the Nation's Capital"; National Capital Planning Commission, 2001.

