

ANALISI DEI RISCHI NATECH IN STABILIMENTI “SEVESO”

Ruffi M.G.¹, Piegai F.², Monnanni G.³

1 ICARO Srl, g.ruffi@icarocortona.it

2 ICARO Srl, f.piegai@icarocortona.it

3 ICARO Srl, g.monnanni@icarocortona.it

SOMMARIO

Le aziende soggette alla normativa Seveso devono sviluppare un'analisi dei rischi per la sicurezza delle persone e per l'integrità dell'ambiente, che tenga conto delle diverse cause iniziatrici di incidenti rilevanti, tra cui eventi naturali, come sismi, tornado, alluvioni, tsunami ed altri.

Lo sviluppo dell'analisi dei rischi originati da cause naturali (rischi “NaTech” o Natural Hazard Triggering Technological Disasters), proposta in questa memoria e centrata in particolare sui rischi connessi a tornado (trombe d'aria) e maremoti (tsunami), parte da una ricerca accurata e organizzata dei dati storici sugli eventi naturali, occorsi nel territorio in cui è inserito uno stabilimento Seveso, alla base di una successiva valutazione di tipo probabilistico delle conseguenze.

Le fonti di informazioni sono costituite da enti di ricerca e banche dati pubbliche, nazionali e internazionali ma anche regionali /locali, e dalla letteratura scientifica specializzata. In base ai dati territoriali raccolti e alle tipologie di possibili danni prevedibili, si possono ipotizzare per le strutture industriali analizzate i rischi di potenziali eventi incidentali rilevanti causati da eventi naturali o meteorologici estremi e prospettare le azioni successive, come la verifica della capacità di resistenza all'evento naturale individuato e l'eventuale necessità di interventi di adeguamento.

1.0 TORNADO

1.1 Generalità

Secondo il Glossario dell'American Meteorological Society (AMS 2000), un tornado è ".....una colonna d'aria in violenta rotazione pendente da un cumulonembo e quasi sempre osservabile come una nube a imbuto". Affinché un vortice sia classificato come un tornado, esso deve essere in contatto sia con il suolo che con la base del cumulonembo. Le sue peculiari caratteristiche sono:

- un diametro del vortice che da poche decine di metri può superare diametri al suolo di 2,5 km;
- velocità traslazionali tra i 50 e i 100 km/h;
- venti di vortice che spirano ad alta velocità, da oltre 100 fino ad oltre 320 km/h, esercitando sulle superfici colpite pressioni dinamiche che, nel caso della massima velocità, possono raggiungere un valore dell'ordine di 1 tonnellata per metro quadrato (0,1 bar ca);
- notevole componente verticale dei venti (le correnti ascensionali possono raggiungere i 300 km/h);
- caduta di pressione che accompagna il passaggio di questi fenomeni, un vero e proprio crollo barico stimato nell'ordine degli 0,1 bar;
- creazione di “wind-borne missiles”, oggetti scagliati a grandi velocità e distanze.

I danni che un tornado può causare sono il risultato di tre tipologie principali di effetti:

- Forze dovute a gradienti di pressione atmosferica.
- Forze indotte dal vento sulle superfici delle strutture esposte (pressioni positive per le superfici sopravento, pressioni negative per le superfici sottovento, pressioni negative localizzate con effetto aspirante).
- Impatti dei detriti scagliati dal vento.

In generale le conseguenze più diffuse di un tornado consistono nello scopercchiamento di edifici e capannoni, nella rottura delle vetrate delle finestre, nell'asportazione di serramenti, nel danneggiamento di strutture metalliche sviluppate in altezza quali torri, tralicci e linee elettriche. Tuttavia, ai livelli di energia più elevati corrispondono distruzioni ancor più consistenti.

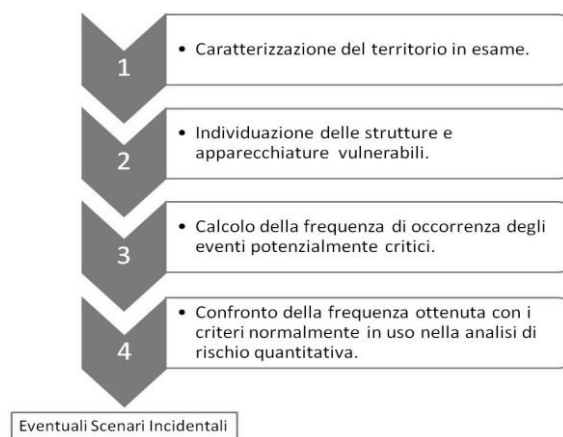
L'intensità di un tornado e la sua potenzialità di generare danni, anche distruttivi, viene in generale correlata alla velocità dei venti generati nel vortice. Quasi tutte le informazioni sulle caratteristiche di un tornado si basano tuttora in prevalenza sul danno osservato, piuttosto che su misurazioni fisiche dirette. La stima dell'intensità dei tornado si basa sulla scala Enhanced Fujita, secondo la riformulazione in vigore dal 2007, la quale si compone di 6 livelli (EF0/EF5).

Tabella 1. Scala Enhanced Fujita [1]

Grado	Velocità del vento in km/h	Danni potenziali
EF0	105–137	Danni lievi: Danni ai camini; spezza i rami degli alberi; abbatte alberi con radici superficiali; danni ai cartelloni e ai segnali stradali.
EF1	138–175	Danni moderati: Stacca la superficie dei tetti; case mobili spostate dalle fondamenta o rovesciate; automobili in movimento spinte fuori strada; i garages possono essere distrutti.
EF2	176–220	Danni considerevoli. Tetti strappati dalle case; case mobili demolite; autorimesse abbattute; grossi alberi spezzati; oggetti leggeri proiettati dal vortice come missili.
EF3	221–269	Il tetto e qualche parete strappati via da case ben costruite; treni deragliati; la maggior parte degli alberi nelle aree boschive vengono sradicati; automobili sollevate da terra e trascinate.
EF4	270–320	Case ben costruite livellate; strutture con fondamenta deboli fatte volare a breve distanza; automobili scaraventate via; grandi missili vengono generati.
EF5	>320	Case con armatura forte sollevate dalle fondamenta e trascinate a distanze considerevoli per disintegrarsi; missili della grandezza di automobili volano nell'aria per distanze superiori ai 100 metri; alberi scortecciati;

1.2 La valutazione di rischio adottata

Per valutare il rischio tornado, per uno stabilimento potenzialmente sorgente di incidenti rilevanti ed ubicato nella regione Puglia, è stato seguito lo schema di principio riportato sotto.



Caratterizzazione del territorio

Per la caratterizzazione del territorio in esame, sulla base del numero di eventi di tornado occorsi negli anni è stata consultata la bibliografia specializzata in materia, specifica per il territorio in esame [2] e l'*European Severe Weather Database* (www.eswd.eu) banca dati che raccoglie le segnalazioni di eventi meteorologici occorsi in tutta Europa suddivisi per diverse tipologie con indicazioni, non sempre disponibili, sull'intensità (Scala Fujita), sulla lunghezza del percorso/larghezza del tornado, sulla durata e sul numero di feriti e morti occorsi a seguito del tornado e di cui di seguito si riporta un estratto dei dati disponibili.

È stato quindi possibile individuare gli eventi di tornado che hanno interessato il territorio della Puglia, evidenziandone la distribuzione temporale e le relative intensità stimate e inquadrando il fenomeno da un punto di vista territoriale con l'individuazione delle zone maggiormente soggette.

Nella regione Puglia, secondo le segnalazioni presenti nel database, si sono verificati in totale, a partire dal 1832, 54 eventi, la cui intensità massima stimata è stato il grado EF3.

<p>Torre Annunziata Campania Italy (40.75N,14.46E) 03-03-2016 (Thursday) 16:00 UTC (+/- 1 hrs.)</p>	<p>Based on: information from : photo or video of the event, a television or radio broadcast, photograph(s) and/or video footage of the inflicted damage, a report on a website. Occurring over: landwater Intensity and characteristics: F1 The intensity rating was based on photograph(s) and/or video footage of the inflicted damage. Suction vortices were not observed. The funnel cloud was observed. <i>Waterspout with landfall; source: "Torre Annunziata, tromba d'aria nel porto e vento forte a Rovigliano", Source: "Tromba d'aria nel Golfo di Napoli: spettacolare video del fenomeno", INMETEO, 03 MAR 2016;</i> http://www.lostrillone.tv/index.php?pag=video&id=449 http://www.inmeteo.net/blog/2016/03/03/tromba-d-aria-nel-golfo-napoli-spettacolare-video-del-fenomeno/ report status: report confirmed (QC1)</p>
---	--

Figura 1. Estratto European Sever Weather Database (www.eswd.eu)

Sulla base delle informazioni disponibili in bibliografia e sul database, solo in relazione agli ultimi dieci anni per cui le segnalazioni presenti acquistano una certa continuità, sono stati individuati 4 eventi che hanno raggiunto tale grado di intensità.

Il territorio della Puglia, esposto nel periodo estivo a temporali a supercella di forte intensità, associati alla discesa di aria fresca e secca dai Balcani che si contrappone con l'aria calda e umida proveniente dal golfo di Taranto, favorisce la formazione di tornado, la maggior parte dei quali ha avuto origine presso la penisola Salentina in direzione SW-NE. Il mese in cui si sono verificati gli eventi più intensi è quello di Settembre, con la quasi totalità degli eventi concentrati tra Maggio e gli inizi di Dicembre.

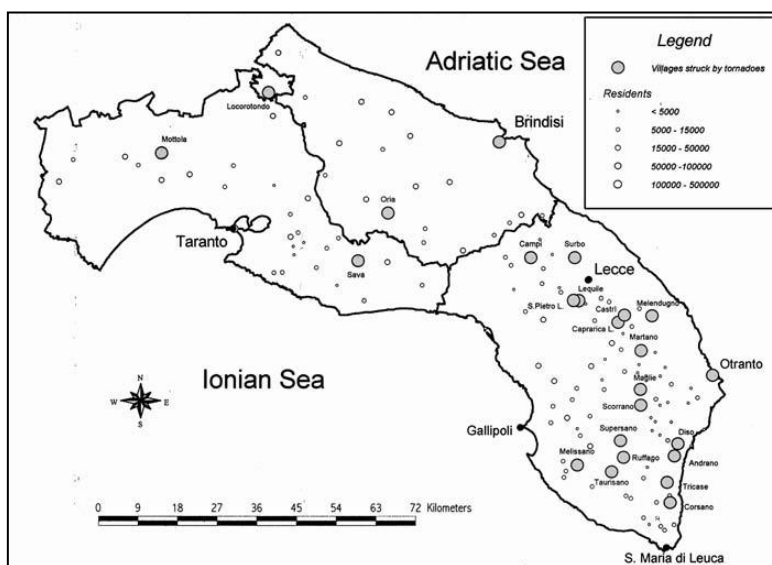


Figura 2. Distribuzione territoriale dei tornado in Puglia [2]

Strutture e apparecchiature vulnerabili

La complessità delle dinamiche innescate da un tornado fa sì che siano difficilmente quantificabili le risultanze combinate delle forze applicate e rende di difficile previsione i conseguenti danni alle apparecchiature ed altre strutture di uno stabilimento, ancor più in grado di generare incidenti rilevanti. La scala Fujita non fa riferimento nella sua classificazione a strutture di carattere industriale, per cui la vulnerabilità generica di tali elementi è stimabile solo approssimativamente, per analogie non sempre applicabili. Tenendo in considerazione che la pressione dinamica¹ e la variabilità dei venti del vortice appaiono costituire una delle minacce principali del tornado (l'altra essendo connessa ai oggetti e frammenti proiettati), sono stati presi come riferimento indicativo, per la vulnerabilità di apparecchiature e strutture,

¹ La pressione dinamica su una parete investita da vento alla velocità v (m/s) può essere calcolata dall'espressione: $P_{din} = 1/2 \cdot \rho v^2$, nella quale P_{din} = Pressione dinamica Pa (N/m²), ρ = Densità aria (kg/m³), considerata pari a 1,225 kg/m³ (livello del mare) e v = Velocità del vento (m/s).

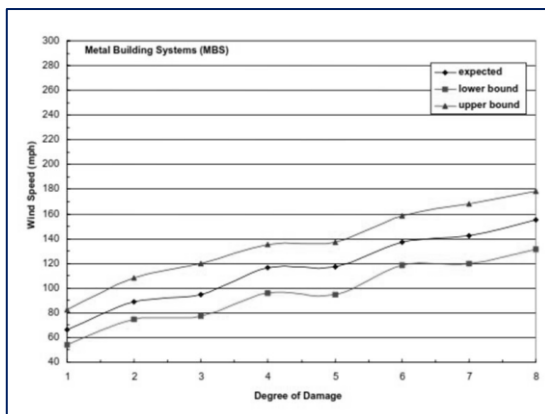
anche i dati di danno connessi alle sovrappressioni dinamiche (riconducibile a esplosioni), disponibili in bibliografia [3]. Tra le apparecchiature maggiormente sensibili alle pressioni dinamiche si possono considerare le strutture sopraelevate presenti negli Stabilimenti industriali (come ad esempio le colonne di distillazione), per le quali anche i livelli di danno minori (light-moderate) sono associati a picchi di sovrappressione dinamica molto elevate (≥ 20 kPa) [3] corrispondenti a velocità del vento superiori a quelle stimate per il Grado EF5.

Grado EF	Velocità max. del vento km/h	Sovrappressione dinamica		Livello di danno
		kPa	bar	
EF1	175	1,50	0,015	Danni moderati:Stacca la superficie dei tetti; case mobili spostate dalle fondamenta o rovesciate; automobili in movimento spinte fuori strada; i garages possono essere distrutti.
EF2	220	2,30	0,023	Danni considerevoli. Tetti strappati dalle case; case mobili demolite; autorimesse abbattute; grossi alberi spezzati; oggetti leggeri proiettati dal vortice come missili.
EF3	269	3,41	0,034	Il tetto e qualche parete strappati via da case ben costruite; treni deragliati; la maggior parte degli alberi nelle aree boschive vengono sradicati; automobili sollevate da terra e trascinate.
EF4	320	4,85	0,048	Case ben costruite livellate; strutture con fondamenta deboli fatte volare a breve distanza; automobili scaraventate via; grandi missili vengono generati.
EF5	oltre i 320			Case con armatura forte sollevate dalle fondamenta e trascinate a distanze considerevoli per disintegrarsi; missili della grandezza di automobili volano nell'aria per distanze superiori ai 100 metri; alberi scortecciati.

Per altre tipologie di strutture presenti in uno Stabilimento è invece stato possibile effettuare una comparazione più realistica con gli indicatori di danno della scala EF, in particolare per quanto concerne i capannoni e magazzini con struttura metallica e per i tralicci metallici di altezza elevata, strutture che risultano inserite tra i 21 Indicatori di Danno, di cui riportiamo un esempio sotto [1].

In base alle indicazioni riportate, danni significativi per queste strutture, rispettivamente il cedimento progressivo dell'impalcatura rigida ed il cedimento del traliccio, sono associati a velocità del vento riconducibili alla classe EF3 della scala e pertanto ritenuti vulnerabili nel caso in esame.

Ad esempio le tipologie di danno atteso per un capannone a struttura metallica per intensità di vento crescenti possono andare dal cedimento delle porte basculanti (Degree Of Damage 1) con venti tra le 40 e le 80 mph (65-130 km/h), al distacco di pannelli metallici dal tetto o dalle pareti della struttura (DOD2), cedimento progressivo dell'impalcatura rigida (DOD7), fino alla distruzione totale dell'edificio (DOD8) con venti tra le 130 e le 180 mph (210-290 km/h –EF3/F4).



DOD*	Damage description	EXP	LB	UB
1	Threshold of visible damage	67	54	83
2	Inward or outward collapsed of overhead doors	89	75	108
3	Metal roof or wall panels pulled from the building	95	78	120
4	Column anchorage failed	117	96	135
5	Buckling of roof purlins	118	95	138
6	Failure of X-braces in the lateral load resisting system	138	118	158
7	Progressive collapse of rigid frames	143	120	168
8	Total destruction of building	155	132	178

* Degree of Damage

Figura 3. Gradi di danno (Degree Of Damage) e Velocità del vento correlata ai “Metal Building System” [1]

Le valutazioni sono state ulteriormente approfondite per apparecchiature di impianto tradizionalmente sorgenti potenziali di incidenti rilevanti, come colonne, reattori, serbatoi. In assenza di altri dati bibliografici che possano fornire indicazioni attendibili o comunque referenziate sui prevedibili danni causati da tornado di differente intensità su apparecchiature di impianto, si sono elaborate alcune stime di massima che valutano la vulnerabilità generica sulla base di:

- Superfici di resistenza esposte e peso;
- Fondazioni solide ed ancoraggi.

Nel caso in esame, i pesi operativi a vuoto ed a pieno delle strutture tipologiche, unitamente alle modalità di ancoraggio al suolo tramite fondazioni pesanti, hanno consentito di valutarle prevedibilmente più stabili dei capannoni, magazzini e tralicci elevati, precedentemente analizzate e in grado di contrastare con maggiore probabilità di successo le componenti dinamiche a cui sarebbero sottoposte, nel caso peggiore ipotizzabile nella regione Puglia, ovvero un tornado di intensità EF3.

Tabella 2. Caratteristiche di alcune apparecchiature tipiche di impianto

Item	Peso a Vuoto (kg)	Peso operativo pieno (kg)	Rapporto Peso vuoto / Superficie esterna (kg/m ²)	Rapporto Peso operat. pieno/ Superficie esterna (kg/m ²)	Rapporto peso a vuoto /Superficie in pianta (kg/m ²)
Reattore	346.075	446.075	478	616	7.863
Purge Bins	131.500	331.500	185	467	4.109
Colonna 1	323.000	1.504.706	303	1.412	21.250
Colonna 2	145.000	418.000	166	480	9.530
Serbatoio	450.000	30.450.000	66	4.492	142

Per quanto concerne le sole correnti ascensionali, che possono arrivare fino a 300 km/h, considerandone l'impatto, semplicisticamente, su una superficie posta in senso ortogonale, si può raggiungere una pressione dinamica pari a oltre 1.100 kg per ogni metro quadrato.

Per le apparecchiature di impianto considerate, che, indicativamente, hanno un peso per unità di superficie in pianta anche assai superiore a 1.100 kg/m², oltre ad essere saldamente ancorate al suolo (ulteriore resistenza), difficilmente si può ipotizzare un loro sollevamento e trasporto a causa della corrente ascensionale.

Dai dati riportati nello studio si è rilevato come le strutture che presentavano maggior criticità, per il rapporto peso/superficie esposta, erano i serbatoi vuoti, che se pur più vulnerabili, sotto il profilo delle azioni generate dal tornado (ma non soggetti alle correnti ascensionali, dato l'appoggio sul fondo e l'ancoraggio), si presentavano comunque nelle condizioni di minore criticità in termini di possibili rilasci incidentali.

Frequenza di occorrenza di eventi critici

Nello studio effettuato, in relazione alle caratteristiche del territorio, sono stati definiti eventi critici, ovvero eventi possibili iniziatori di incidente rilevante sotto l'aspetto delle pressioni dinamiche generate, i tornado la cui intensità fosse uguale al livello EF3. Sulla base delle statistiche disponibili si può effettuare una prima stima della frequenza storicamente accertata per i tornado di classe EF 3 (F₃), sia a livello nazionale che nel territorio nel quale è ubicato lo stabilimento analizzato, espressa come occasioni/anno. Questa frequenza si applica all'intera superficie territoriale di riferimento (A₃) per la quale sono stati considerate le occorrenze storiche di tornado.

In relazione all'area di danno, va rilevato che la velocità dei venti generati e la conseguente pressione dinamica varia all'interno di un tornado; la fascia di maggior danno per un tornado di classe EF3 (considerata negli indicatori di danno) può essere delimitata intorno ai 150 m di ampiezza [4]. Per valutare l'area di maggior impatto prevedibile per lo stabilimento, si è conservativamente considerato quindi un percorso che intersecasse lo stabilimento con una larghezza di 150 m, in modo da interessarne la maggior superficie possibile (A_{S3}).

La frequenza con la quale un tornado di intensità pari a EF3 può quindi potenzialmente generare danni nello stabilimento analizzato è stata quindi stimata come $F_3 \times A_{S3} / A_3$, che nel caso in esame ha portato ad un valore molto conservativo e pari a: $7,56 \times 10^{-7}$ occ/anno.

Valutazione finale del rischio tornado.

La frequenza dell'occorrenza di un tornado di intensità EF3, in grado di generare danni consistenti a strutture quali magazzini e strutture metalliche elevate all'interno dello stabilimento appare di per sé molto bassa e tale da presupporre uno scenario incidentale che, con le dovute e necessarie ipotesi probabilistiche sulla sua evoluzione, avrebbe avuto frequenze ancora più basse. Pur considerando i danni prevedibili per le strutture vulnerabili è stato ragionevolmente esclusa l'eventualità di scenari credibili di incidente rilevante, data la

estremamente remota possibilità di coinvolgimento di apparecchiature contenenti sostanze pericolose in un tornado di sufficiente intensità, tale da indurre un cedimento catastrofico. La proiezione di oggetti di massa significativa risulta altresì estremamente improbabile, data l'intensità massima attesa di un eventuale tornado.

2.0 TSUNAMI

2.1 Generalità

A differenza delle tradizionali onde marine, prodotte dal vento e dalle correnti, l'onda di maremoto, lo Tsunami, agisce come un'intensa perturbazione sottomarina che coinvolge l'intera colonna d'acqua, dal fondale fino alla superficie. Le onde create da simili forze improvvise possono presentare lunghezze d'onda che raggiungono anche i 240 km. In acque profonde in genere sono alte solo 30-60 centimetri e caratterizzate da altissima velocità di propagazione: la velocità di propagazione è una funzione alquanto complessa della profondità del mare e della lunghezza d'onda che influisce in misura minore, approssimabile alla seguente:

$$V = \sqrt{gh}, \quad (1)$$

Dove V – Velocità di propagazione dell'onda, m/s; g – Accelerazione di gravità, m/s²; h – profondità del mare, m.

Quando lo Tsunami si avvicina alla costa, il fondale, divenendo sempre più basso, provoca attrito sulla perturbazione sottomarina, costringendola a rallentare improvvisamente la sua elevata velocità di propagazione. Per il principio di conservazione dell'energia, crescerà a dismisura l'altezza dell'onda, fino alla formazione di un vero e proprio muro d'acqua; in assenza di importanti fenomeni di rifrazione, l'onda insorge come una grande alta marea, invadendo la terra ferma. Se il cavo dell'onda raggiunge per primo la costa, avremo l'effetto "draw-down" di abbassamento del livello del mare, seguito dall'effetto di "run-up" di innalzamento repentino del livello del mare. Le principali caratteristiche di un'onda di tsunami sono riportate nella figura seguente.

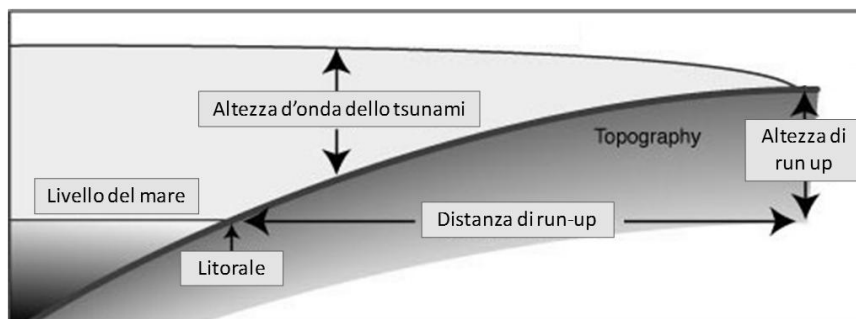


Figura 4. Principali caratteristiche degli tsunami (<http://www.sms-tsunami-warning.com>)

Causa di tsunami possono essere i terremoti, le frane sottomarine e le eruzioni vulcaniche. La soglia di magnitudo per un terremoto generatore di tsunami, assunta dal sistema d'allarme oggi in funzione nel Pacifico (Pacific Tsunami Warning System PTWS), è pari alla magnitudo 6,5 della Scala Richter.

Analisi storiche pubbliche su eventi naturali estremi causa di incidenti su impianti industriali, consentono di fare alcune valutazioni sia sull'incidenza che tali eventi hanno sul totale di incidenti, sia su quali tra gli eventi naturali risultino quelli maggiormente frequenti. L'analisi storica condotta sulle principali banche dati internazionali disponibili, (MARS, U.S. CSB, SOZOGAKU, ARIA, MIDHAS), su un totale di 16.543 incidenti avvenuti tra il 1916 e il 2016, ha individuato 236 incidenti causati da eventi naturali estremi per lo 1,42% del totale. Di questi il 62% del totale sono stati causati da fulminazioni, mentre la seconda causa di incidenti risultano le alluvioni con il 22%.

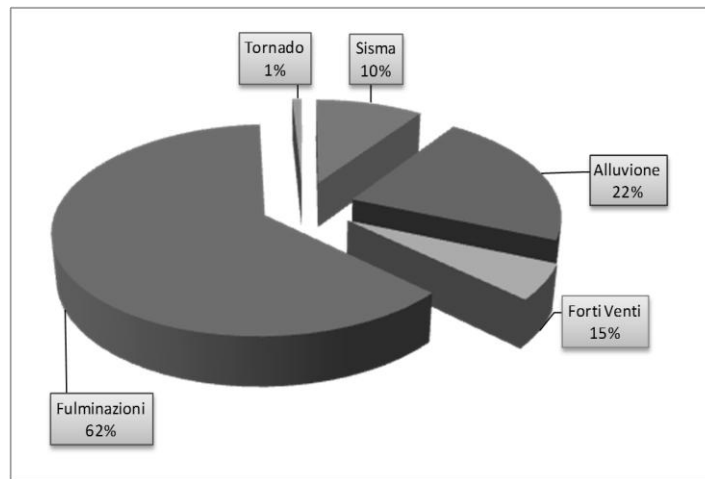


Figura 5. Incidenti causati da eventi naturali

È evidente come sia i tornado che gli tsunami siano eventi che per le loro frequenze raramente risultano origine di incidenti rilevanti. Le energie in gioco tuttavia e gli stessi mutamenti climatici in atto inducono ad una attenta valutazione dei rischi industriali connessi al loro avvenimento.

2.2 La valutazione di rischio adottata

Per valutare il rischio tsunami per uno stabilimento soggetto al D.Lgs. 105/2015 ed ubicato nella regione Sicilia, è stato seguito il seguente schema:



Valutazione preliminare del territorio in esame

Una prima valutazione del territorio per verificarne la predisposizione ad essere soggetto a fenomeni di tsunami verificatisi storicamente è stata possibile consultando il Catalogo degli Tsunami euro-mediterranei, che contiene più di 290 maremoti, classificati sia sulla base dell'intensità, secondo la scala Ambraseys-Sieberg che riconosce 6 gradi sulla base degli effetti del maremoto (da 1= molto lieve, strumentale al 6=disastroso) (http://roma2.rm.ingv.it/it/risorse/banche_dati/52/catalogo_degli_tsunami_euro-mediterranei). In sintesi oltre ai dati storici contenuti nel Catalogo, si può considerare genericamente soggetto a tsunami un territorio all'interno del bacino del Mediterraneo che:

- si trovi ad una distanza dalla linea di costa inferiore ai 1.000 m (la maggiore ingressione delle acque si è avuta in occasione dello tsunami del 30/07/1627 nel Gargano quando le acque sfruttando la foce del fiume Fortore si addentrarono per circa 3.000 metri),
- risulti ad alta pericolosità sismica (Zone Classificate 1e 2 ex OPCM 3274/2003 e s.m.i.) o che abbia nelle vicinanze zone ad alta pericolosità sismica,
- abbia zone vulcaniche attive, emerse o sommerse (Es. Tsunami Stromboliano del 30 dicembre 2002).

Caratterizzazione dell'onda di tsunami

Sulla base degli eventi già verificatisi nel bacino del Mar Mediterraneo, alcuni studi referenziati [5,6,7], utilizzando modelli matematici, hanno fornito indicazioni utili per stimare la massima intensità, proprio in termini di altezza d'onda prevista per le coste del Mediterraneo, considerando come sorgenti tsunamigeniche quelle che per caratteristiche fisiche, ed evidenze storiche sono risultate più rilevanti, ad esempio l'Arco Ellenico, la Scarpata Ibleo-Maltese. Ad esempio per la costa della Sicilia, misurata in chilometri, partendo da un punto scelto arbitrariamente, la fonte [5] riporta le seguenti altezze d'onda derivanti da un ipotetico tsunami generato a seguito di un sisma generatosi nell'Arco Ellenico.

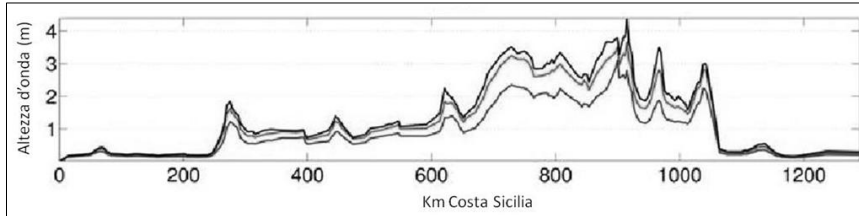


Figura 6. Profili di altezza d'onda attesa per le coste della Sicilia [5]

Il successivo passo è stato quello di riuscire a prevedere a che distanza e con quale altezza l'onda prevista poteva investire la terra ferma. Le due principali modalità di propagazione di un'onda di tsunami lungo la terra ferma sono riportate nella figura seguente.

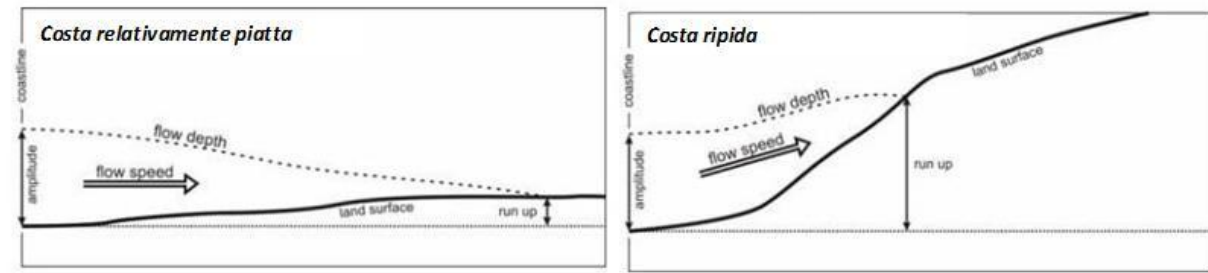


Figura 7. Propagazione di un'onda sulla terra ferma [8]

Per ripide pendenze (riquadro a destra) l'onda risale la costa perdendo rapidamente energia in termini di altezza d'onda e velocità arrivando comunque ad altezze di run-up rilevanti, a volte anche significativamente superiori a quelle dell'onda iniziale. Per pendenze lievi (riquadro a sinistra) risulta evidente un decremento costante dell'altezza d'onda lungo il suo propagarsi nella terra ferma. Esiste, in particolare per queste ultime tipologie di costa, una correlazione tra il massimo run-up potenziale di un'onda e la distanza di ingressione sulla terra ferma, in grado di quantificare il decremento di energia che avviene durante questa fase. Genericamente è possibile prevedere un decremento di run-up di circa 1m ogni 200 m di ingressione sulla terra ferma [9], come mostra la figura seguente. Tale assunzione è presa, ad esempio, come regola per definire le zone di evacuazione in varie nazione soggette a fenomeni di tsunami (es. Nuova Zelanda, isole Samoa).

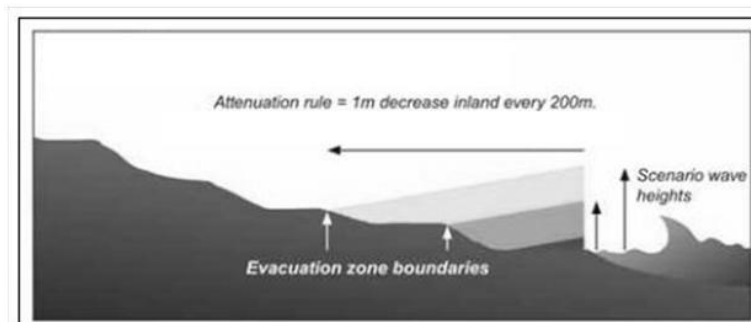


Figura 8. Regola di attenuazione [9]

Considerando come in mare aperto (v. formula pag.6), la velocità dell'onda è una funzione dell'altezza d'onda, in maniera generica è quindi possibile prevedere, a mano a mano che l'onda procede lungo la terra ferma, un decremento della velocità dell'onda direttamente proporzionale con quello della sua altezza [10].

Individuazione delle strutture e apparecchiature vulnerabili

Gli tsunami e le conseguenti inondazioni possono generare differenti tipologie di carichi addizionali sulle strutture ed apparecchiature degli impianti industriali. Tra questi i principali sono:

- carichi idrostatici esercitati dall'acqua, sia in stato di quiete che in lento movimento, su ogni superficie a contatto con essa, agenti lateralmente e perpendicolarmente e causati da uno squilibrio di pressione dovuto a differenti altezze d'acqua ai due lati della struttura;
- carichi idrostatici che agiscono verticalmente su strutture ed apparecchiature parzialmente o totalmente sommerse dall'acqua;
- carichi idrodinamici risultanti dall'acqua in movimento, in funzione della velocità del flusso e della geometria della struttura;
- carichi dovuti agli impatti di detriti trasportati dalle acque.

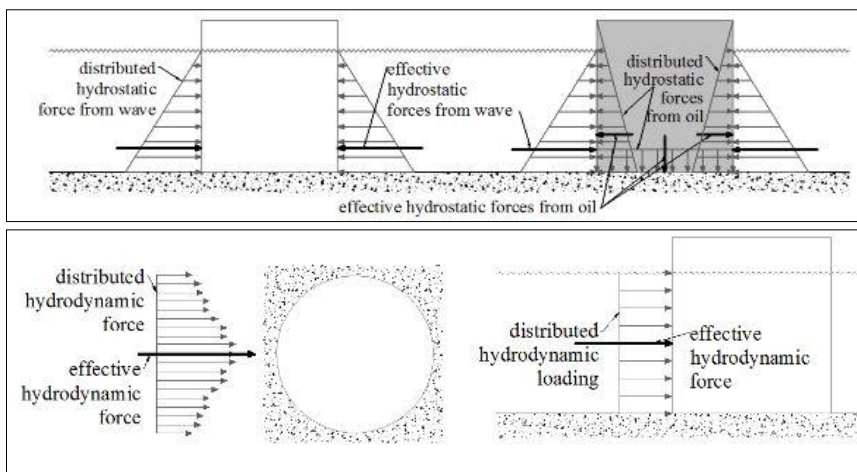


Figura 9. Carichi idrostatico e idrodinamico [11]

A fronte dei carichi addizionali generati dagli tsunami, è stato possibile fare un'analisi qualitativa che permettesse di individuare quali tra le apparecchiature di impianto risultassero più critiche a seguito di eventi di inondazione. Tale analisi si è basata sulle risultanze della ricerca riportata nella fonte [12] finalizzata allo studio di incidenti industriali causati da inondazioni in impianti contenenti sostanze pericolose, sia ricadenti nell'ambito del D.Lgs. 105/15 che non, condotta sui principali database Europei e Statunitensi. Su un totale di 272 casi, si è osservato come i serbatoi di stoccaggio atmosferici ed a tetto galleggiante fossero le categorie di gran lunga più coinvolte in incidenti di questo tipo e risultate più vulnerabili. In generale, il 74% delle apparecchiature coinvolte in incidenti causati da eventi di inondazione, evidenziati nello studio [12] risultano serbatoi di stoccaggio, particolarmente per le quantità di sostanze contenute in tali apparecchiature.

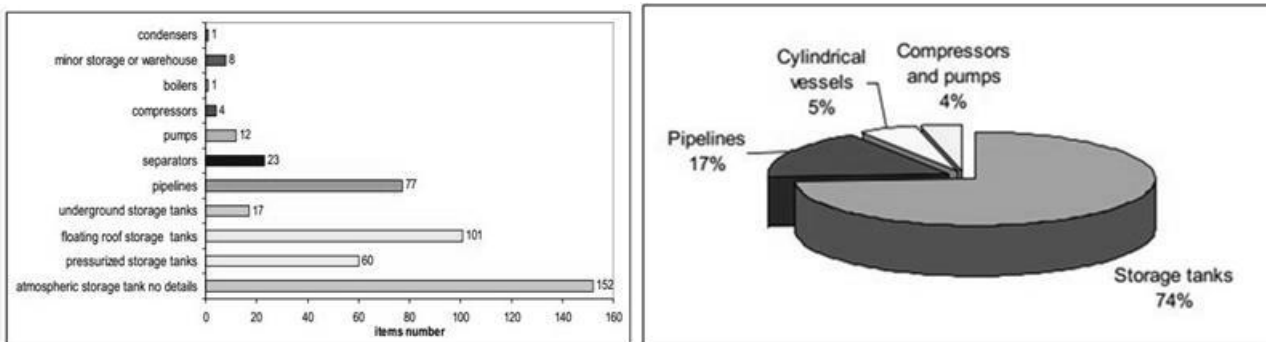


Figura 10. Apparecchiature coinvolte in incidenti causati da inondazioni [12]

Stima delle probabilità di danneggiamento

In particolare per i serbatoi di stoccaggio la definizione di un indice di vulnerabilità è correlata al superamento di definite soglie di probabilità di danneggiamento a seguito dell'onda di tsunami, caratterizzata in termini di altezza e velocità dell'onda. Queste correlazioni, chiamate anche curve di fragilità, derivano da elaborazioni basate su dati storici, inerenti i danni subiti da diverse tipologie di serbatoi (ad es. del tipo ancorato o non ancorato, serbatoi pressurizzati, ecc.), di cui nella figura seguente possiamo osservare un esempio.

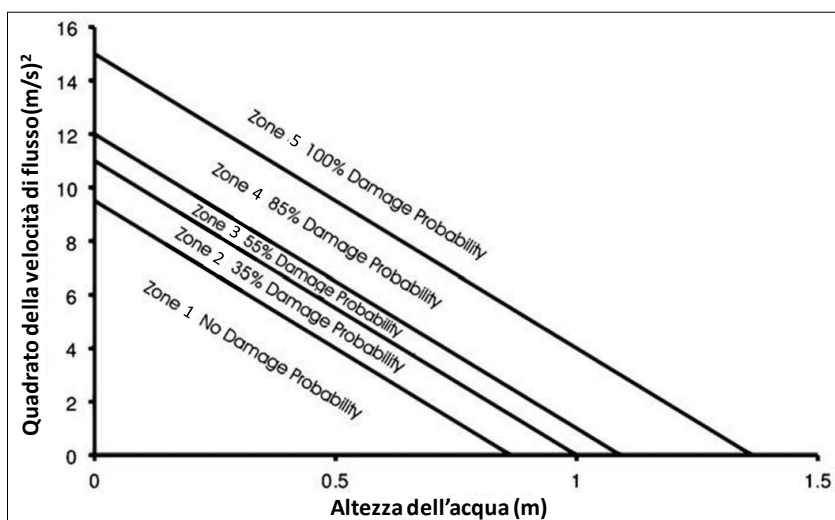


Figura 11. Curve di fragilità [6]

Risulta di significativa rilevanza il livello di riempimento delle apparecchiature investite da un eventuale onda di tsunami. La figura seguente evidenzia la relazione tra la resistenza dei serbatoi, espressa come percentuale di serbatoi che si conservano integri a seguito di eventi di inondazione, ed il loro livello di riempimento. Si osserva come con l'avvicinarsi a un valore di riempimento dei serbatoi pari al 10% incrementi sensibilmente, fino a raggiungere la totalità, la percentuale di serbatoi in grado di resistere all'evento di inondazione senza danni. Nel caso in esame la densità del contenuto può risultare leggermente inferiore al valore di tabella.

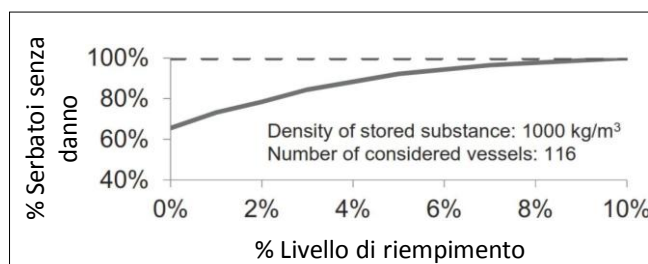


Figura 12. Relazione tra livello di riempimento e capacità di resistenza dei serbatoi [13]

Valutazione del rischio tsunami

Partendo dai valori di altezza d'onda previsti dagli studi presi come riferimento e considerando, da analisi storica, i serbatoi di stoccaggio come le apparecchiature maggiormente critiche in caso di inondazione, è stato possibile, applicando la regola di attenuazione (figura 8), stimare il massimo valore di run-up raggiungibile da tale onda lungo la costa prospiciente allo Stabilimento in esame e successivamente a valutare i livelli di altezza dell'onda attesi per i serbatoi di stoccaggio potenzialmente investiti dall'onda sulla base della massima distanza di ingressione stimata, considerando in via puramente cautelativa anche l'ipotesi di propagazione dell'onda senza alcuna attenuazione (figura 13).

I valori ottenuti di altezza d'onda, sono stati poi confrontati con le curve di fragilità disponibili in letteratura, per stimare la probabilità di eventuali danneggiamenti alle apparecchiature, che, anche tenendo conto della densità relativa, si approssima allo zero per tutti gli item considerati.

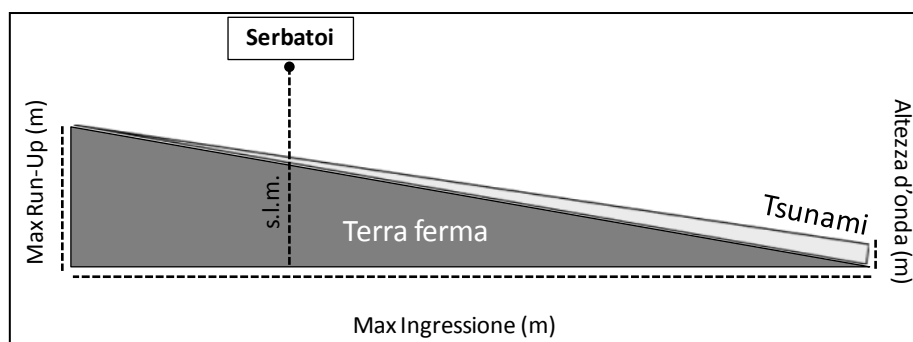


Figura 13. Schema semplificato di propagazione senza attenuazione e posizione dei serbatoi in esame

Le analisi sono state integrate con la successiva valutazione delle misure di protezione naturali e artificiali presenti presso lo stabilimento ed in grado di attenuare gli eventuali effetti prodotti dall'inondazione, costituite da opere a mare quali la diga foranea e una scogliera frangiflutti e strutture di stabilimento quali i bacini di contenimento.

Considerando infine l'influenza del livello di riempimento sulla probabilità di danneggiamento a seguito di inondazione (Figura 12) si è infine considerato il fatto che serbatoi con bassi livelli o vuoti, pur essendo più vulnerabili ad eventuali danneggiamenti, si presentano comunque nelle condizioni di minore criticità in termini di possibili rilasci massivi, potenziali sorgenti di incidenti rilevanti.

RIFERIMENTI

- [1] McDonald, J., Kishor, C. M., Mehta, St. Pierre, J., Simiu, E., Enhanced Fujita Scale (EF-scale), 2004, Wind Science & Engineering Center, Texas Tech University.
- [2] Gianfreda, F., Miglietta, M., Sansò, P., La terra degli uragani, 2006, Colibri.
- [3] Van Geel, P.L.B.A., Method for the determination of possible damage, 2005, The Netherlands Organization of Applied Scientific Research.
- [4] Brooks, H. E., On the Relationship of Tornado Path Length and Width to Intensity, Weather Forecasting, Vol.19, 2004, pp 310-318.
- [5] Lorito, S., Tiberti, M.M., Basili, R., Piatanesi, A., Valensise, G., Earthquake-generated tsunamis in the Mediterranean Sea: Scenarios of potential threats to Southern Italy, Journal of Geophysical Research, Vol 18, 2008, pp 1-14.
- [6] Cruz, A., Franchello, G., Krausmann, E., Assessment of Tsunami risk to an oil refinery in southern Italy, 2009, JRC Scientific and Technical Report.
- [7] Tiberti, M.M., Lorito, S., Basili, R., Kastelic, V., Piatanesi, A., Valensise, G., Scenarios of Earthquake-Generated Tsunamis for the Italian Coast of the Adriatic Sea, Pure and Applied Geophysics, No 165, 2009, pp 2117-2142.
- [8] Leonard, G.S., Saunders, W.S.A., Prasetya, G, Integrating tsunami inundation modeling into land use planning, GNS Science Miscellaneous Series, No 34, 2001, 42p.
- [9] Fraser, S.A., Power, W.L., Validation of a GIS-based attenuation rule for indicative tsunami evacuation zone mapping, GNS Science Report No 2013/02, 2013, 21p.
- [10] Matsutomi, H., Kensuke, O., Kenji, H., al. Inundation flow velocity of tsunami on land and its practical use, Coastal Engineering Proceedings, No 32, 2010, pp 1-10.
- [11] Brooker, H., Tsunami Impact on fuel storage containers, 2011, NEES REU Program, Lehigh University.
- [12] Campedel, M., Analysis of Major Industrial Accidents Triggered by Natural Events Reported In the Principal Available Chemical Accident Databases, 2008, JRC Scientific and Technical Report.
- [13] Landucci, G., Tugnoli, A., Antonioni, G., Cozzani, V., Damage models for storage and process equipment involved in flooding events, Chemical Engineering Transactions, Vol. 31, 2013, pp. 697-702.