

## Sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria - Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

**“STRUCTURAL BEHAVIOUR, OPTIMIZATION AND DESIGN OF A SOLAR CHIMNEY PROTOTYPE UNDER WIND LOADING AND OTHER ACTIONS”**

**“COMPORTAMENTO STRUTTURALE, OTTIMIZZAZIONE E PROGETTO DI UN PROTOTIPO DI CAMINO SOLARE SOGGETTO AL CARICO DEL VENTO E AD ALTRE AZIONI”**

Autore: Francesca LUPI

Relatori: Prof. Ing. Claudio BORRI - Prof. Ing. Ruediger HOEFFER - Prof. Ing. Hans-Juergen NIEMANN  
Prof. Ing. Maurizio ORLANDO - Prof. Ing. Paolo SPINELLI

Data di laurea: 9 Luglio 2009

*È ormai certo che l'impegno primario delle nuove generazioni di ingegneri dovrà essere concentrato sulle molte forme di energia rinnovabile, dando nuova spinta all'innovazione nei diversi settori ad essa collegati.*

*La tesi di Francesca Lupi prende in esame e sviluppa con alcuni contributi originali uno dei cosiddetti “grand challenges” per l'ingegneria strutturale del terzo millennio: torri solari a camino dell'altezza di 1.0 – 1.5 km. Fra le molte questioni tuttora aperte (ed oggetto di attenzione da parte di un gruppo di ricerca internazionale), Francesca Lupi ha affrontato e brillantemente risolto l'aspetto di ottimizzazione dell'irrigidimento perimetrale (lungo i paralleli) della parete, in modo da garantire alla struttura il comportamento di una gigantesca trave, soggetta ad una formidabile azione del vento.*

Claudio BORRI

### 1. INTRODUZIONE

I camini solari costituiscono la più nuova e potente (ancorchè oggi in gran parte inesplorata) tecnologia per la produzione di energia rinnovabile. Il principio di funzionamento di queste strutture, che per la totale assenza di emissioni inquinanti rappresentano la più sostenibile risorsa di energia, si basa sullo sfruttamento della radiazione solare e del naturale sollevamento dell'aria calda.

Il primo a proporre tale tecnologia è stato l'ingegnere spagnolo Cabanyes, nel 1903. Successivamente, un contributo fondamentale è stato dato da Jörg Schlaich, che nel 1982 ha realizzato in Spagna, a Manzanares, un prototipo di camino solare alto 200 m avente una potenza di 50 kW. La struttura, costruita esclusivamente per fini sperimentali, ha operato per oltre sei anni, e le misurazioni effettuate su di essa hanno fornito risultati importanti per gli studi successivi. Tuttavia, da allora nessun altro camino solare è mai stato realizzato, neppure in prototipo.

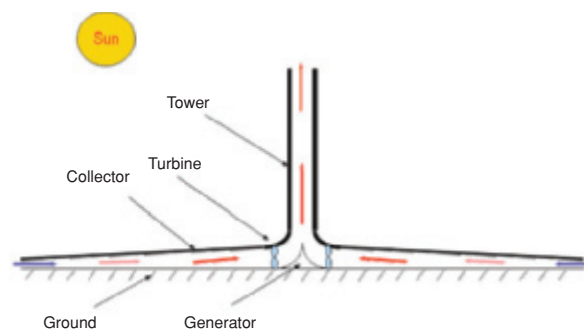


Fig. 1 - Principio di funzionamento di un camino solare.

L'impianto di un camino solare è costituito essenzialmente da tre componenti: la torre, il collettore, e le turbine. La torre, in cemento armato, può avere un'altezza che va dai 500 m ai 1500 m. L'enorme collettore, che circonda la torre alla base, ha una copertura in acciaio e vetro il cui diametro può raggiungere i 7 km. Le potenze previste come raggiungibili variano dai 50 MW ai 400 MW per ogni camino (fig. 1).

La radiazione solare, diretta e diffusa, riscalda l'aria all'interno del collettore, creando un effetto serra. L'aria calda si muove verso il centro del collettore e tende a salire nel camino. Ai piedi della torre sono presenti delle turbine e dei generatori di energia, che producono energia elettrica sfruttando l'energia cinetica del flusso d'aria ascendente. La produzione di energia dipende essenzialmente da due parametri: il diametro del collettore e l'altezza della torre. Questo giustifica dunque le enormi dimensioni della struttura. Infatti, maggiore è il diametro del collettore, maggiore è la quantità d'aria che si riscalda e l'incremento di temperatura che si ha nel collettore stesso; maggiore è l'altezza della torre, maggiore è la differenza di pressione che si viene a creare e che garantisce il moto ascendente del fluido. Tale differenza di pressione è dovuta alla diversa densità dell'aria: l'aria interna al camino presenta infatti, grazie al riscaldamento dovuto alla radiazione solare, una temperatura più alta dell'aria esterna. Un camino solare alto 1000 m con un collettore di diametro pari a 5 km ha una potenza di 200 MW; impianti di dimensioni maggiori possono arrivare a 400 MW. Tutto questo però presuppone una radiazione solare sufficientemente forte (>2200 GWh), come si ha nei deserti fino a 30° di latitudine nord e sud.

## 2. GEOMETRIA DELLA STRUTTURA E ANALISI DEI MODI DI VIBRARE

Le torri solari hanno geometria cilindrica; la parte inferiore generalmente si allarga a formare un iperboloido. Nel presente lavoro è stata analizzata una torre in cemento armato alta 1000 m: la parte inferiore (da 0 a 450 m) è un iperboloido, mentre la parte superiore (da 450 m a 1000 m) è un cilindro circolare. Il diametro inferiore è pari a 280 m, quello superiore è 150 m (fig. 2).

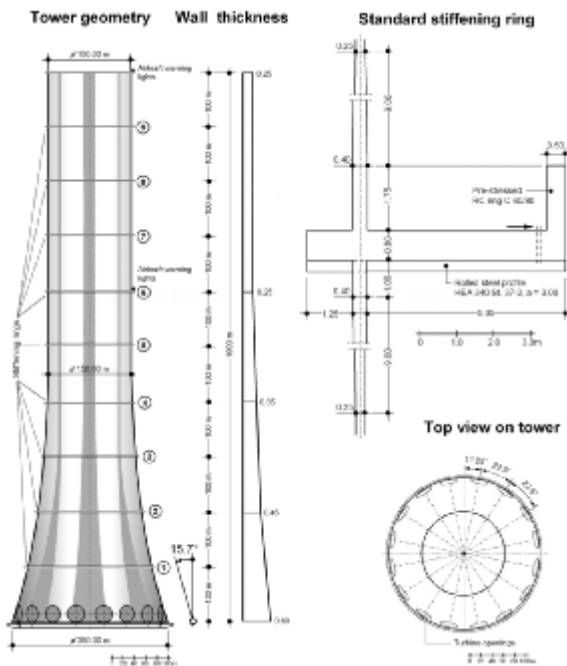


Fig. 2 - Geometria della struttura (figura per gentile concessione di Krätzig & Partners GmbH Bochum).

Incredibilmente sottile è lo spessore del guscio: soli 25 cm nella parte superiore, risulta leggermente più elevato nella parte inferiore raggiungendo, a terra, il valore massimo di 60 cm. Si tratta, per dare un'idea, di un guscio dieci volte più sottile di un foglio di carta arrotolato a formare un cilindro. È quindi una struttura che, se non irrigidita, tende a ovalizzarsi quando è soggetta al carico. Per evitare questo, lungo la torre sono disposti degli anelli di irrigidimento, anch'essi in cemento armato (eventualmente precompresso), di cui vediamo una sezione tipo nella figura 2.

L'importanza degli anelli di irrigidimento si nota innanzitutto nell'analisi dei modi di vibrare della struttura. La torre ha un rapporto altezza diametro abbastanza alto, (circa 7), che la rende sufficientemente snella e dunque assimilabile ad una trave a mensola. Tuttavia, in assenza di anelli di irrigidimento, si manifesta un comportamento tipico di una struttura a guscio, caratterizzato cioè da ovalizzazione della sezione. Tutto questo si osserva nella figura 3, che riporta il primo, il terzo e il quinto modo di vibrare della struttura (si osservi che, data la simmetria della struttura, gli autovettori sono uguali a due a due) (fig. 3).

L'introduzione di un certo numero di anelli di irrigidimento lungo la torre consente di ottenere un comportamento a trave a mensola nella prima forma modale. Tale comportamento garantisce una migliore distribuzione delle caratteristiche di sollecitazione nella struttura riducendo gli sforzi. La figura 4 mostra i primi modi di vibrare della struttura con dieci anelli di irrigidimento; tuttavia sono sufficienti soli cinque anelli per garantire questo buon comportamento dal punto di vista delle forme modali.

## 3. L'AZIONE DEL VENTO

Le azioni agenti sulla struttura comprendono il peso proprio, l'azione del vento, della temperatura, il ritiro del calcestruzzo, l'azione sismica, i cedimenti differenziali del suolo e i carichi di costruzione. Tra tutti questi carichi, l'azione del vento gioca il ruolo più importante. In generale, il campo di vento agente su una struttura si può scomporre in una componente media, responsabile della risposta statica, ed una componente fluttuante, che provoca la risposta dinamica. Quest'ultima, in base alla rigidità della struttura, può essere di tipo quasi statico o risonante. Nel caso in esame, la struttura presenta una frequenza naturale  $f_1$  pari a 0.17 Hz e il suo comportamento è di tipo quasi-statico. Seguendo l'approccio proposto dall'Eurocodice 1 (ben consapevoli però degli inevitabili limiti della normativa riguardo una struttura la cui altezza è al di là dell'attuale esperienza), sono state applicate alla torre pressioni statiche equivalenti e, attraverso il fattore di struttura, sono stati considerati l'effetto di riduzione per la correlazione parziale delle pressioni del vento e l'effetto, seppur piccolo, di amplificazione in risonanza.

È stato fatto però riferimento ad una distribuzione dei coefficienti di pressione esterna diversa da quella proposta dall'Eurocodice per le strutture a cilindro. La normativa infatti non mette in conto un effetto che nei cilindri sufficientemente snelli si estende per un'ampia regione e non può essere trascurato: l'effetto di sommità. Nella regione di sommità del cilindro le particelle di fluido tendono a passare dalla regione di pressione anteriore a quella di suzione posteriore non soltanto lateralmente, ma anche da sopra il cilindro stesso. Questo comporta un'alterazione della distribuzione delle pressioni nella regione di sommità della torre e, dal punto di vista della risposta along wind della struttura, un aumento del coefficiente di drag nella regione di sommità, così come si può vedere nella figura 5.

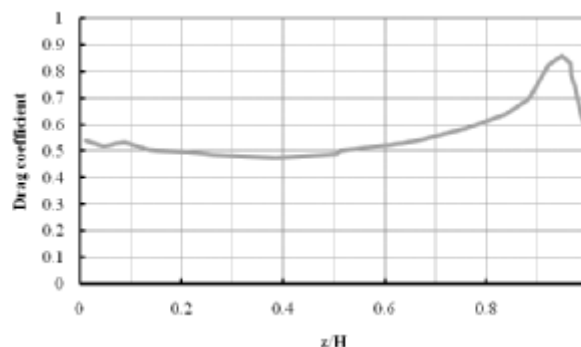


Fig. 5 - Distribuzione dei coefficienti di drag lungo l'altezza della torre (effetto di sommità).

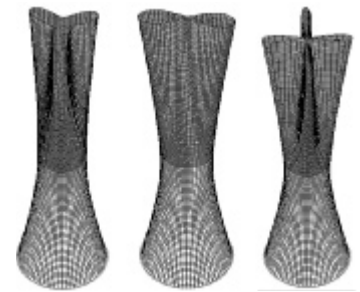


Fig. 3 - Modi di vibrare della struttura in assenza di anelli di irrigidimento. Il parametro "n" indica il "numero di onde" che ovalizzano la sezione trasversale.

1° modo:  $n = 3$ ;  $f_1 = f_2 = 0.073$  Hz;  
 $T_1 = T_2 = 13.606$  s;  
 3° modo:  $n = 2$ ;  $f_3 = f_4 = 0.086$  Hz;  
 $T_3 = T_4 = 11.616$  s;  
 5° modo:  $n = 4$ ;  $f_5 = f_6 = 0.118$  Hz;  
 $T_5 = T_6 = 8.440$  s.



Fig. 4 - Modi di vibrare della struttura con dieci anelli di irrigidimento. Il parametro "n" indica il "numero di onde" che ovalizzano la sezione trasversale.

1° modo:  $n = 1$ ;  $f_1 = f_2 = 0.172$  Hz;  
 $T_1 = T_2 = 5.812$  s;  
 3° modo:  $n = 2$ ;  $f_3 = f_4 = 0.311$  Hz;  
 $T_3 = T_4 = 3.216$  s;  
 5° modo:  $n = 2$ ;  $f_5 = f_6 = 0.395$  Hz;  
 $T_5 = T_6 = 2.531$  s;  
 Si noti che il 3° e il 5° modo di vibrare presentano un uguale "numero di onde" ma differiscono nel "numero di punti nodali" lungo il meridiano (uguale a 1 e a 2, rispettivamente).

Tale effetto di sommità è stato messo in conto nel lavoro mediante l'utilizzo dei coefficienti di pressione misurati in galleria del vento su cilindri a diverso rapporto di snellezza ([3]). La figura 6 mostra come si modifica la distribuzione dei coefficienti di pressione in una regione rappresentativa della torre (da 900 m a 1000 m).

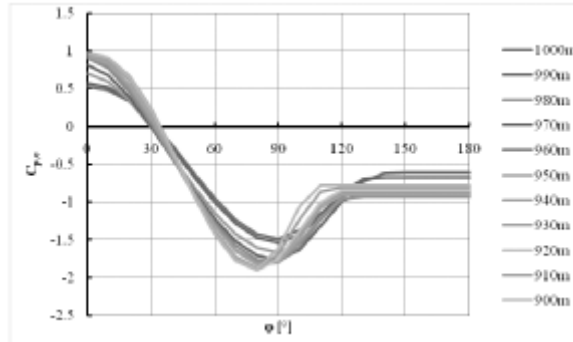


Fig. 6 - Distribuzione dei coefficienti di pressione nella regione di sommità della torre (effetto di sommità).

#### 4. L'AZIONE DELLA TEMPERATURA

Gli effetti termici sono causati dall'incremento di temperatura dell'aria all'interno del collettore, dovuto alla radiazione solare. Secondo gli studi di J.Schlaich ([5]), una buona stima di tale aumento di temperatura dell'aria è circa 30°C. Ciò significa che, riferendoci ad esempio una temperatura media dell'aria esterna di 30°C (temperatura media nella stagione estiva dei deserti subtropicali dell'Africa), all'interno della torre (alla base) sono raggiunti i 60°C. Il profili lungo l'altezza della torre della temperatura dell'aria interna e esterna devono essere tracciati considerando i rispettivi gradienti termici: internamente, il tasso di diminuzione della temperatura è approssimabile a quello di un'adiabatica (1°C/100m), esternamente, si utilizza il gradiente dell'atmosfera standard (6.5°C/1000m).

A partire dai profili di temperatura dell'aria lungo l'altezza della torre, seguendo l'approccio proposto dall'Eurocodice è stato possibile definire la temperatura della parete in calcestruzzo, sulla base della resistenza termica del materiale. Il calcolo è stato effettuato nella condizione estiva, invernale, e di fuori servizio (così come è riportato in [7] per le torri di raffreddamento). Tuttavia, poiché gli effetti termici sulla struttura in calcestruzzo sono più grandi se più grande è la differenza di temperatura tra l'aria interna ed esterna al camino, nelle analisi successive è stato fatto riferimento unicamente alla situazione ritenuta più gravosa per un camino solare: la condizione estiva, nella quale si ha un riscaldamento più alto dell'aria nel collettore.

#### 5. RISPOSTA DELLA STRUTTURA E OTTIMIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO

Il passo successivo è stato l'analisi della risposta della struttura in termini di caratteristiche di sollecitazione. L'obiettivo dello studio era quello di migliorare il comportamento cercando di minimizzare, nella combinazione agli stati limite ultimi, gli sforzi di trazione.

Questo consente in primo luogo di sfruttare meglio le proprietà del materiale, il calcestruzzo, risparmiando armatura per la torre. Inoltre, se la sezione rimane interamente compressa, non c'è rischio di ribaltamento della struttura a causa dell'azione del vento e il calcolo delle fondazioni è agevolato (con conseguente riduzione dei costi).

In pratica, mantenendo fissati la forma e lo spessore del guscio (fig. 2), le variabili del processo di ottimizzazione sono state il numero, la rigidità e la posizione degli anelli di irrigidimento. Essi infatti, contrastando la tendenza della sezione a ovalizzarsi, migliorano, a parità di risultante, la distribuzione delle caratteristiche di sollecitazione nella struttura, con conseguente riduzione dei massimi sforzi. Diverse questioni entrano però in gioco. Infatti, dal punto di vista strutturale gli anelli di irrigidimento sono necessari, per quanto è stato appena detto; tuttavia, la loro presenza ostacola il processo costruttivo, rendendolo più lento, più complicato, e dunque più costoso. Quindi il numero di anelli dovrebbe essere il più piccolo possibile. Evidente è la necessità di un compromesso e, parametro chiave per il confronto tra i diversi modelli analizzati, è stata la quantità di armatura verticale necessaria, che varia dalle 5000 tonnellate circa, la quantità minima per normativa, fino a valori tre volte superiori. Tale parametro fornisce infatti un'immediata quantificazione degli sforzi di trazione presenti nella struttura.

La figura n.7 riporta lo sforzo normale nel meridiano a 0°, ovvero in direzione del vento, dovuto al peso proprio (il cui contributo è riportato in valore assoluto) e all'azione del vento, amplificata con il fattore di sicurezza di 1.6 come suggerito dalle linee guida tedesche VGB ([7]) nella combinazione agli SLU. La torre ha in questo caso dieci anelli di irrigidimento. Si osserva, nella parte inferiore della torre, la necessità di ridurre lo sforzo normale di trazione.

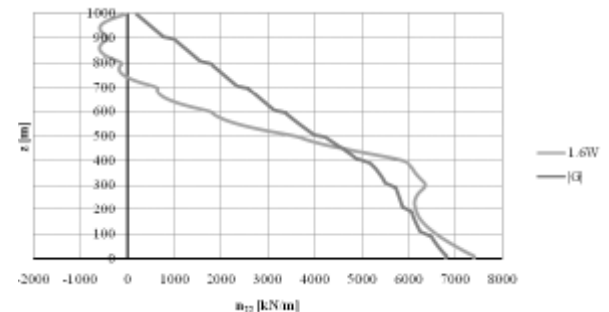


Fig. 7 - Sforzo normale di meridiano nella direzione del vento (0°), nella combinazione agli stati limite ultimi.

Le prime analisi del processo di ottimizzazione sono state condotte sulla struttura con dieci anelli di irrigidimento: è stata aumentata la rigidità di alcuni di essi ed è stato osservato come sia possibile ottenere una migliore distribuzione delle caratteristiche di sollecitazione irrigidendo maggiormente i soli anelli nella parte cilindrica della torre. L'iperboloide inferiore, infatti, si mostra già sufficientemente rigido, sia per lo spessore, leggermente più elevato, sia per la sua stessa forma. Tutto ciò è mostrato nella figura 8.

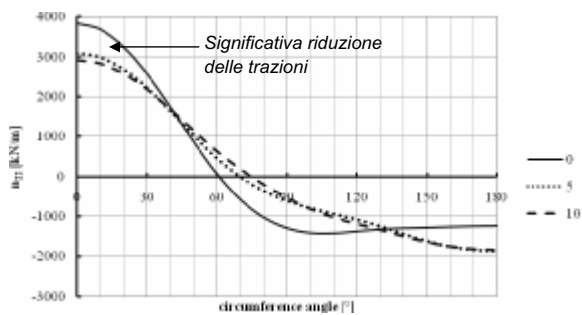


Fig. 8 - Distribuzione lungo la circonferenza dello sforzo normale di meridiano causato dall'azione del vento ad una quota rappresentativa critica lungo l'altezza della torre (350 m). Sono presenti dieci anelli di irrigidimento lungo la torre. La legenda rappresenta il numero di anelli, a partire dall'alto, la cui rigidità è triplicata rispetto al valore standard.

Essa rappresenta la distribuzione lungo la circonferenza dello sforzo normale di meridiano causato dall'azione del vento ad una quota rappresentativa critica lungo l'altezza della torre (350 m). La legenda rappresenta il numero di anelli, a partire dall'alto, la cui rigidità è triplicata rispetto al valore standard. In particolare, si osserva che triplicando la rigidità dei cinque anelli più alti si ha una notevole riduzione delle trazioni nella parte sopravento. Se però aumentiamo la rigidità di tutti e dieci gli anelli, l'ulteriore miglioramento che si ottiene rispetto al caso precedente è insignificante.

Una strategia combinata, che preveda sia un aumento di rigidità degli anelli, sia una riduzione del fattore di sicurezza sull'azione del vento (e analisi statistiche dimostrano che ciò è possibile senza ridurre il target di affidabilità), consente di ottenere risultati altrettanto buoni anche con un numero inferiore di anelli.

La soluzione proposta a conclusione dello studio è stata una torre con sette, e non dieci, anelli di irrigidimento, con rigidità di tutti gli anelli, eccetto dell'ultimo in alto, raddoppiata. Tale soluzione fornisce risultati analoghi a quelli che si avrebbero se gli anelli fossero dieci e la loro rigidità quella standard. Il confronto fra i due grafici di figura 9, molto simili, lo dimostra. Entrambi i grafici rappresentano la distribuzione lungo la circonferenza dello sforzo normale di meridiano ad un livello rappresentativo critico (350 m). La combinazione è agli stati limite ultimi per diversi valori del fattore di sicurezza sull'azione del vento. Il peso proprio (D) non è amplificato perché considerato favorevole.

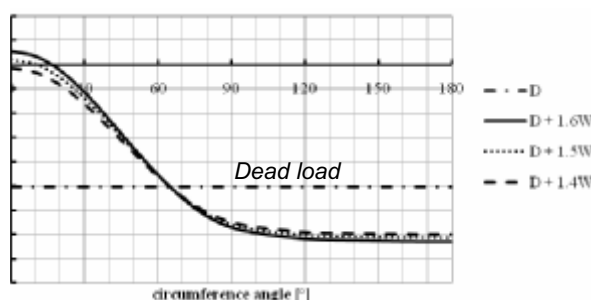
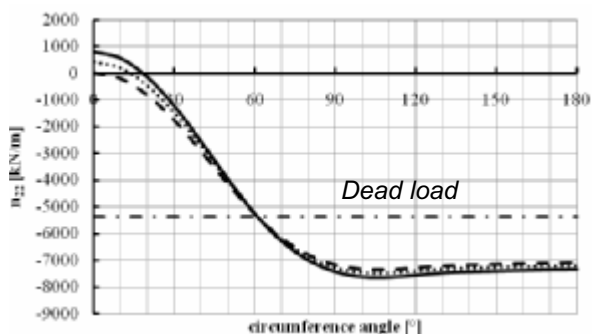


Fig. 9 - Distribuzione lungo la circonferenza dello sforzo normale di meridiano ad un livello rappresentativo critico (350 m). Combinazione agli stati limite ultimi per diversi valori del fattore di sicurezza sull'azione del vento. a) Dieci anelli di irrigidimento con rigidità standard; b) Sette anelli di irrigidimento con rigidità raddoppiata.

Osserviamo infine che, con una riduzione del fattore di sicurezza sull'azione del vento al valore di 1.5 (come propone l'Eurocodice) o addirittura 1.4, invece di 1.6 (valore proposto dalla normativa tedesca VGB per le torri di raffreddamento) è possibile annullare gli sforzi normali di trazione e puntare dunque a realizzare la torre con il minimo di armatura necessaria prevista dalla normativa, vale a dire, per l'intera torre, in direzione orizzontale e verticale, complessivamente circa 12000 tonnellate di acciaio. Queste, rapportate al volume di calcestruzzo, di circa 200000 m<sup>3</sup>, danno un grado di armatura molto basso, di 60 kg/m<sup>3</sup>.

Ancora molte questioni, per una struttura di questo tipo, devono essere approfondite. Tuttavia, lo studio ha mostrato come sia possibile, agendo su pochi parametri chiave (in questo caso gli anelli di irrigidimento, il loro numero, la loro posizione e la loro rigidità), migliorare significativamente il comportamento strutturale. Pertanto, ulteriori ricerche, nuove strategie di ottimizzazione, ed una più fedele e dettagliata simulazione del campo di vento ad alte quote, potranno in futuro incrementare la fattibilità economica di questa nuova tecnologia.

## 6. BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

[1] Von Backström Th. W., Harte R., Höffer R., Krätzig W.B., Kröger D.G., Niemann H.-J., van Zijl G.P.A.G. (2008). "State and Recent Advances in Research and Design of Solar Chimney Power Plant Technology", VGB PowerTech 88, 64-71.

[2] Harte R., Krätzig W.B., Niemann H.-J. (2008). "From Cooling Towers to Chimney of Solar Upwind Power Plants", ASCE Structures congress, Texas.

[3] Symposium on wind effects on buildings and structures, (1968). R.W.E. Gould, W. G. Raymer and P.J. Ponsford, Wind tunnel tests on chimneys of circular section at High Reynolds Number, Loughborough.

[4] Niemann H.-J., Lupi F., Höffer R., Hubert W., Borri C., (2009). "The Solar Updraft Power Plant: Design and Optimization of the Tower for Wind Effects", EACWE 5, 5th European African Conference on Wind Engineering, Florence.

[5] Schlaich J. (1995). "The Solar Chimney, Electricity from the Sun", Edition A. Menges, Stuttgart, Germany.

[6] Borri C., Pastò S. (2006), "Lezioni di Ingegneria del vento", Ed. Firenze University Press.

[7] VGB-610 Ue, (2005). "Structural Design of Cooling Towers, Technical Guideline for the Structural Design, Computation, and Execution of Cooling Towers", VGB Kraftwerkstechnik, Essen, Germany.