

**POLITECNICO DI MILANO**

**Facoltà di Ingegneria Edile - Architettura**

**Corso di laurea magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi**



**Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto:  
modellazioni igrotermiche per la valutazione  
di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo  
di modi di guasto**

**Tesi di Laurea di:**

**Matteo Maria Marabelli                      Matr. 751246**

**Marco Varini                                      Matr. 749676**

**Relatore:                      Prof. Bruno Daniotti**

**Co-relatore:                      Ing. Riccardo Paolini**

**Anno Accademico 2011 - 2012**

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

*This page is intentionally left blank*

# RINGRAZIAMENTI

Un sincero ringraziamento al Professor Bruno Daniotti per averci accolto con il suo entusiasmo coinvolgente nel gruppo di ricerca sulla Durabilità del Dipartimento Best e guidato con la sua esperienza nello sviluppo di questa tesi.

La possibilità che ci ha dato di partecipare al XII DBMC – 12th International Conference on Durability Building Materials and Components è stata di grande stimolo per affrontare con passione questi mesi di lavoro.

Grazie all'Ing. Riccardo Paolini per essere stato il nostro co-relatore, per la sua disponibilità, il grande aiuto e i suoi suggerimenti costruttivi.

Un dovuto ringraziamento a Rockwool per l'assistenza nell'ambito del "progetto OLIVO".



# ABSTRACT

Questa analisi fornisce uno scenario completo del clima che caratterizza il Sud dell'Europa, descrivendo le condizioni climatiche di alcune città che meglio lo rappresentano, per valutare il comportamento degli ETICS.

Vengono forniti per ogni città i dati orari e giornalieri relativi a temperatura esterna e superficiale, umidità relativa, radiazione solare, pioggia e quantitativo d'acqua nei materiali nel periodo estivo e invernale. Vengono successivamente fissati dei limiti che rappresentano una condizione estrema e calcolata la frequenza con cui questi vengono superati nell'arco di 8760 ore.

I dati climatici utilizzati provengono da diverse fonti: WUFI che si riferiscono ad un solo anno noto e dispongono dei dati relativi alla pioggia; METEONORM effettuati su più anni non definiti e completi di pioggia e dati TEST REFERENCE YEAR presi su più anni noti ma sprovvisti dei valori della pioggia.

Per la loro completezza i dati WUFI e METEONORM risultano più attendibili per effettuare l'Analisi degli shock termici nelle diverse città; in alcuni casi viene fatto un confronto tra le due fonti per la stessa città.

I risultati ottenuti nelle diverse città offrono un quadro degli agenti esterni che potrebbero compromettere le caratteristiche degli ETICS. Per ogni caso preso in esame si ottengono interessanti risultati, in relazione alle caratteristiche delle zone climatiche in cui si trovano.

## PAROLE CHIAVE

ETICS, WUFI, TRY, METEONORM



# ABSTRACT

This Thesis represents a complete background of typical South European climates, showing cities' weather conditions in order to study their effects on ETICS.

We provide the exterior Surface Temperature, exterior Temperature, exterior Relative Humidity, Solar Radiation, Driving Rain Sum, and Water content inside different materials of ETICS. For each of these data we set "treshold", which represent a risk of failure, and we count how many time they exceeded , considering the total number of event ( 8760 h) in 1 year.

Weather database comeS from different sources: software WUFI ( 1 year record, rain available ); METEONORM ( recorded over more unknown years, rain available ) and TEST REFERENCE YEAR ( more known years, rain not available ).

METEONORM and WUFI data are more completed, thus reliable to analyze the Surface Temperature variation and Thermal Shock in the different cities.

With the achieved results we can estimate the risk of failure that can occur to ETICS for each city we have studied.

## KEYWORDS

ETICS, WUFI, TRY, METEONORM, THERMAL SHOCK





# INDICE

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>13</b>
1.0 Oggetto .....	13
1.1 Obiettivi .....	15
<b>2. VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ .....</b>	<b>17</b>
2.0 Il metodo di valutazione della durabilità dei componenti edilizi .....	17
2.1 I parametri di stima della durabilità .....	20
2.1.1 Affidabilità.....	20
2.1.2 Tasso di guasto.....	21
2.1.3 Vita Utile.....	21
2.2 Metodologia per la valutazione della vita utile di un elemento tecnico .....	22
2.3 Normativa di riferimento.....	26
<b>3. ANALISI DELLA LETTERATURA.....</b>	<b>27</b>
3.0 Introduzione .....	27
3.1 Analisi climatiche comparate .....	29
3.1.1 Influenza degli shock termici in differenti contesti climatici.....	29
3.1.2 Il comportamento degli isolanti in lana minerale negli ETICS a contatto con l'acqua .....	31
<b>4. TRASPORTO DI CALORE E UMIDITÀ : TERMINI DI BASE E FORMULE IGROTERMICHE .....</b>	<b>35</b>
4.0 Introduzione .....	35
4.1 Modello fisico .....	36

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

4.2	Dati di input .....	37
4.2.1	<i>Moisture storage function</i> .....	43
4.2.2	<i>Diffusività del vapore acqueo</i> .....	45
4.2.3	<i>Conducibilità termica dipendente dall'umidità</i> .....	47
4.2.4	<i>Trasporto dell' umidità sotto la temperatura di congelamento</i> .....	47
4.3	Equazioni di Trasporto .....	48
<b>5.</b>	<b>CASI DI STUDIO : ANALISI IGROTERMICHE CON SOTWARE WUFI</b> .....	<b>53</b>
5.0	Approccio alle analisi .....	53
5.1	Analisi preliminare.....	61
5.2	Seconda analisi : cicli estate/inverno .....	74
5.2.1	<i>Analisi climatica</i> .....	74
5.2.2	<i>Analisi parametrica preliminare</i> .....	85
5.3	Analisi parametrica .....	88
5.3.1	<i>Simulazioni con ETICS in Lana Minerale</i> .....	90
5.3.1.1	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici</i> .....	90
5.3.1.2	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia</i> .....	93
5.3.1.3	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia nella stagione estiva</i> .....	96
5.3.1.4	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia e dalle alte temperature superficiali</i> .....	99
5.3.1.5	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici suddivisi in classi di temperature</i> .....	102
5.3.2	<i>Simulazioni con ETICS in EPS</i> .....	106
5.3.2.1	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici</i> .....	107
5.3.2.2	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia</i> ...	110
5.3.2.3	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia nella stagione estiva</i> .....	113
5.3.2.4	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia e dalle alte temperature superficiali</i> .....	116
5.3.2.5	<i>Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici suddivisi per classi di temperature</i> .....	119
5.4	Valutazione critica dei risultati ottenuti : confronto tra ETICS in lana minerale e EPS....	129
5.4.1	<i>Confronto della frequenza e intensità degli shock termici</i> .....	129
5.4.2	<i>Confronto contenuti d'acqua negli strati dei due diversi ETICS</i> .....	138

<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>143</b>
6.0 Risultati ottenuti .....	143
6.1 Linee di sviluppo .....	145
<b>ALLEGATO A .....</b>	<b>147</b>
<b>ALLEGATO B .....</b>	<b>159</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>255</b>
Indice delle Figure .....	259
Indice delle tabelle.....	261



# 1. INTRODUZIONE

## 1.0 Oggetto

Il clima sta cambiando e le previsioni rivelano che questi cambiamenti continueranno e saranno sempre più significativi con il passare del tempo. Questo avrà forti impatti su vari aspetti della vita di tutti e sicuramente sulle prestazioni igrotermiche degli edifici e di conseguenza sulla durabilità dei suoi componenti.

Nell'ambito del progetto "OLIVO" in collaborazione con Rockwool International concentriamo la nostra ricerca sul comportamento degli ETICS ( External Thermal Insulation Building System), una tecnologia costruttiva di isolamento esterno su pareti con un sottile strato di intonaco sull'isolante che migliora notevolmente le performance energetiche. I sistemi a cappotto sono largamente diffusi in tutta Europa; l'EOTA ( European Organisation for Technical Approval ), incaricata dalla Commissione Europea ha approvato le linee guida del sistema tecnico con l'emissione dell'ETAG 004 ( European Technical Approval Guideline ).

Pioggia, Sole, Umidità Relativa, Shock Termici e Vento svolgono un ruolo cruciale nei processi di degrado degli ETICS e influiscono sulla durabilità dei vari componenti edilizi. Ognuno di questi agenti, può provocare diversi tipi di guasti. Nel caso degli ETICS, questi possono agire principalmente sullo strato di finitura e in corrispondenza delle interfacce tra isolante e intonaco e cambiano a seconda dei materiali che costituiscono la stratigrafia.

I dati meteorologici usati sono raccolte di misurazioni climatiche dei diversi siti, effettuate su più anni per poter avere una rappresentazione omogenea e significativa del luogo. In questo modo si evita che un anno anomalo dal punto di vista climatico, falsi i risultati delle simulazioni.

## *Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

In una fase preliminare della nostra ricerca, i Data Set utilizzati provengono da banche date WUFI e Test Reference Year; per un livello più dettagliato di analisi abbiamo utilizzato dati Meteonorm, completi di tutti i valori climatici, compresi pioggia e vento, assenti negli altri data set.

Per ogni singolo materiale che compone la stratigrafia bisogna conoscere: la densità, la porosità, la conduttività, il calore specifico, il contenuto d'acqua tipico, il contenuto d'acqua a saturazione e il coefficiente di assorbimento d'acqua. Alcuni dati sono reperibili da scheda tecnica., mentre altri, come i contenuti d'acqua, si conoscono solo se vengono svolte le specifiche prove di assorbimento in laboratorio, come da normative UNI EN ISO 12570 e ( Prova di Essiccamento) e UNI EN ISO 12571 ( igotermica dei materiali e dei prodotti per l'edilizia).

Una volta che si hanno a disposizione i dati climatici del luogo e tutte le proprietà dei materiali scelti, si possono iniziare le simulazioni. I risultati ci consentono di sapere come varia l' U.R. a seconda del contenuto d'acqua; l'andamento della conduttività del singolo materiale o dell'intera stratigrafia in funzione della temperatura, del contenuto d'acqua o della temperatura.

A questo punto analizzando i dati e confrontandoli con i diversi climi, un materiale potrà essere preferito ad un altro perchè più performante in termini di consumo energetico, durabilità o prestazioni igrotermiche.

Nel nostro caso proponiamo l'analisi del comportamento di un determinato ETICS soggetto alle differenti condizioni climatiche presenti nel sud dell'Europa, in particolare su alcune città italiane, spagnole, portoghesi, francesi, svizzere e turche.

Le città scelte per l'analisi sono state classificate utilizzando la norma ISO 15686-7 che suddivide l'Europa in diverse fasce climatiche che vanno da 35° di Latitudine Nord ai 70° di Latitudine Nord, comprendo un ampio range di differenti condizioni climatiche. Le maggiori sono quelle tra le temperature ambiente e la differenza di radiazione solare nelle diverse localizzazioni. La combinazione di questi fattori rivela che il rapporto tra le reazioni chimiche che avvengono possono essere dell'ordine di 1:4 tra il Sud e il Nord dell'Europa. Le tre fasce climatiche sono la A ( condizioni di Inverno freddo con una media delle temperature inferiore a 0°C e in Estate temperature che raramente raggiungono i 30°C), zona B ( Inverni moderati con frequenti gelate e media delle temperature compresa tra 0°C e 5°C ed Estati dove a volte si superano i 30°C) e zona C ( Inverni caldi con media delle temperature superiore ai 5°C e Temperature estive frequenti sopra i 30°C e occasionalmente anche sopra i 40°C). Interessandoci del Sud dell'Europa rientriamo nelle zone B e C anche se le città Svizzere e del Nord Italia hanno inverni freddi.

Identificando le due fasce climatiche possiamo raggruppare le città che vi appartengono, confrontando la latitudine, l'altezza sul livello del mare, la radiazione solare e la piovosità di ognuna di queste e individuare le caratteristiche comuni o le differenze.

Il livello di deterioramento di un materiale può essere correlato direttamente agli andamenti climatici delle diverse zone e alle sue specifiche caratteristiche. Anche la presenza di umidità all'interno dell'ETICS, a seconda del clima in cui si trova, porterà a diversi tipi di danni come formazioni microbiche, efflorescenze o distaccamenti.

## 1. Introduzione

La prima fase del report è più generale; per ogni città vengono riportati i fattori climatici esterni : temperature esterne, umidità relativa, piovosità e radiazione solare, orarie e giornaliere per un arco di tempo di un anno, per un totale di 8760 ore, suddividendo il periodo estivo e quello invernale

E' stata calcolata e messa in evidenza la frequenza e l'intensità con cui si presentano determinati range di valori critici per umidità relativa esterna e temperatura esterna. In un'ulteriore analisi sono stati riportati gli shock termici, orari e giornalieri relativi ad ogni città, in condizioni sempre più critiche e in base a quante volte questi accadono.

Un passo successivo è stato quello di combinare gli agenti, valutando l'intensità e la frequenza degli shock termici con la presenza della pioggia, radiazione solare, di giorno e di notte.

### 1.1 Obiettivi

L'obiettivo è quello di sapere dove i cambiamenti termici sull'ETICS avvengono, perchè, sotto quali condizioni specifiche, quando, in concomitanza di quali agenti, la frequenza e l'intensità di eventi critici per valutare l'invecchiamento del sistema.

Con un'analisi dei metodi di guasto è possibile poi capire quali sono i più comuni per un ETICS e successivamente focalizzarci sugli agenti, azioni ed effetti che provocano il deterioramento del sistema. Una volta individuati gli agenti, si identificano le condizioni climatiche critiche che li influenzano e simulandole si può valutare il comportamento del sistema soggetto a questi forti stress.

Conoscendo le specifiche condizioni climatiche del luogo in cui si deve realizzare un edificio, è possibile valutare tutti i tipi di agenti atmosferici a cui sarebbe soggetto, quali condizioni estreme si potrebbero verificare e di conseguenza gli eventuali guasti che potrebbero ricorrere.

Avendo a disposizione uno scenario preciso e completo delle condizioni climatiche e degli agenti atmosferici specifici di un determinato luogo, è possibile fare le scelte corrette sul tipo di tecnologia e materiali da usare, realizzando un ETICS ad hoc per ogni possibile localizzazione geografica, con la sicurezza di non incorrere in futuro a guasti e danni [Künzel 2011]. Le caratteristiche di un intonaco che si adatta bene al clima di Madrid, non potranno essere le soluzioni migliori per quello di Locarno o lo spessore di un isolante da utilizzare in un cappotto a Lisbona sarà diverso da quello che si sceglie a Milano. E' invece possibile che i materiali scelti per la realizzazione di un ETICS a Marsiglia, vadano bene anche a Barcellona.

Questo vuol dire conoscere la temperatura superficiale delle pareti per tutte le esposizioni a tutte le ore del giorno; vuol dire sapere quanti mm di pioggia cadono e in che direzione, essere a conoscenza di che Umidità Relativa si raggiunge sia quando sta piovendo sia quando c'è il sole, poter misurare quanta umidità si è accumulata nei singoli materiali.

Dati precisi permettono di poter scegliere il materiale che meglio si adatta alle caratteristiche del clima in cui si trova il nostro edificio e andando ancora più nello specifico, di conoscere in quali periodi, sia dell'anno che della giornata, si verificano le condizioni più estreme.

Questo studio è un punto di partenza molto importante su cui poter impostare i successivi test di laboratorio di invecchiamento accelerato.





## 2. VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ

### 2.0 Il metodo di valutazione della durabilità dei componenti edilizi

Il metodo di valutazione della durabilità dei componenti, in prima analisi, prevede la stima di valori di durata di Vita Utile in condizioni convenzionali di riferimento (Reference Service Life), dato iniziale di input nelle fasi progettuali per un confronto selettivo tra diverse soluzioni tecniche afferenti alla medesima classe di elementi tecnici.

La valutazione della “vita utile di riferimento” è infatti per lo più indirizzata a quegli Enti preposti al controllo della durabilità degli elementi tecnici nella fase di produzione e in particolar modo per la certificazione di durabilità dei prodotti, che si vuole inserire come ulteriore prova da effettuare da parte dei produttori per l’ottenimento del marchio CE relativamente alla Direttiva CEE 89/106 sui prodotti da costruzione.

Il termine “riferimento” sta quindi ad indicare le condizioni al contorno assunte dal produttore che certifica la durabilità del suo prodotto fuori sistema e considerando condizioni di uso e di degrado plausibili e che mediamente si verificano

Questa stima di durata potrà essere considerata come dato di input dal progettista e corretta per tenere conto del contesto reale di progetto, della destinazione d’uso e di altri fattori ambientali che potranno influenzare la previsione di durata ai fini delle fasi di progettazione, gestione e manutenzione di un intervento edilizio.

In questo studio risulta fondamentale l’analisi prestazionale e funzionale del componente in modo da poter valutare attraverso prove di invecchiamento accelerato e naturale il decadimento delle caratteristiche del componente stesso ottenendo dei modelli di calcolo che simulino l’andamento delle prestazioni tecnologiche e delle condizioni ambientali nel tempo sino al raggiungimento dei limiti prestazionali e quindi la fine della vita utile.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

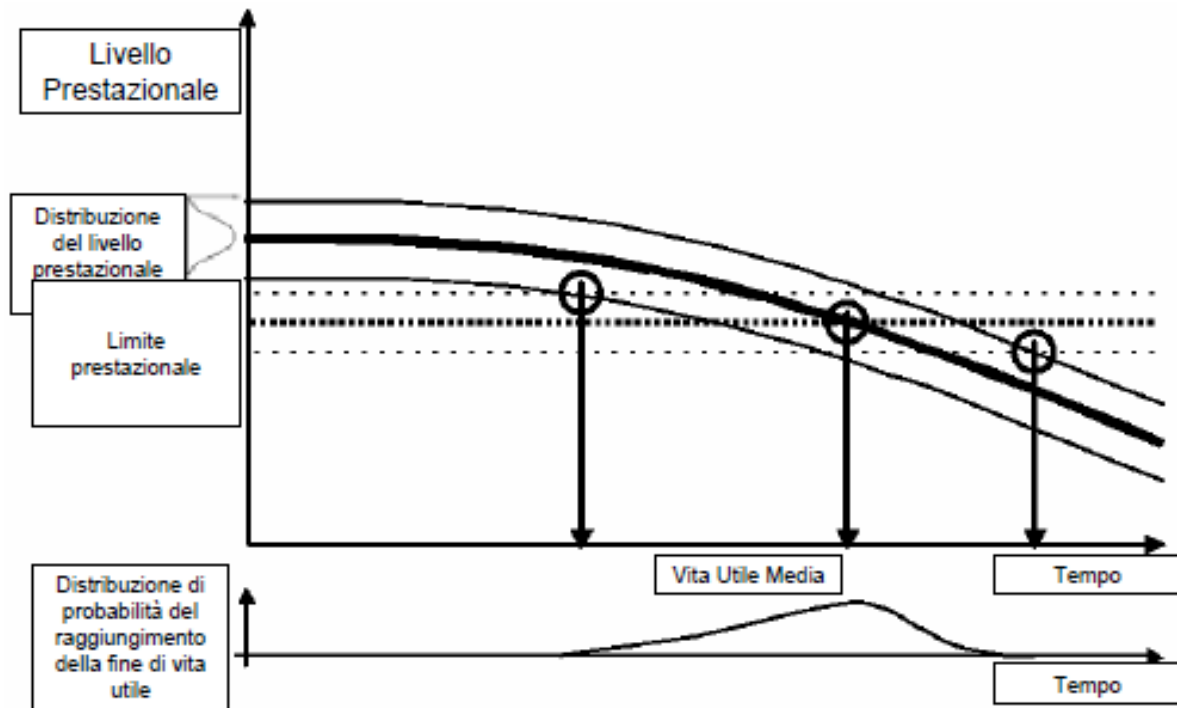


Figura 1 : Andamento livelli prestazionali (esemplificativo)

Un altro aspetto legato alla valutazione preventiva della durabilità è la definizione del programma manutentivo di un edificio e dei piani di manutenzione delle sue parti tecnologiche. In particolare se la programmazione gestionale dell'edificio prevede per una strategia di manutenzione programmata di tipo preventivo secondo condizione o predittivo di soglia, risulta indispensabile avere informazioni sulla durabilità dei componenti utilizzati.

La definizione articolata del programma di manutenzione, con le informazioni dettagliate dei piani di manutenzione articolati per i diversi elementi tecnici, con indicazione dei tempi, delle risorse e dei costi consente quindi (assieme alle indicazioni di esercizio) una pianificazione della vita dell'edificio con una previsione economica nel ciclo di vita dello stesso (Lifa Cycle Cost).

Una rielaborazione di questa informazione per tenere conto delle ricadute ambientali (in termini di consumo di risorse e inquinamento ambientale) dei programmi di manutenzione (ed esercizio) dell'edificio consente di sviluppare un aspetto di valutazione di impatto ambientale del ciclo di vita (Lifa Cycle Assessment) allo scopo finale della determinazione della valutazione della Sostenibilità del Processo Edilizio (con l'aggiunta delle valutazioni relative alle fasi di produzione dei prodotti edilizi e di demolizione con eventuale riciclaggio o riuso di prodotti e materiali).

## 2. Valutazione della Durabilità

La procedura applicativa del metodo di valutazione della durabilità dei componenti può essere riassunta secondo lo schema di Figura 2.

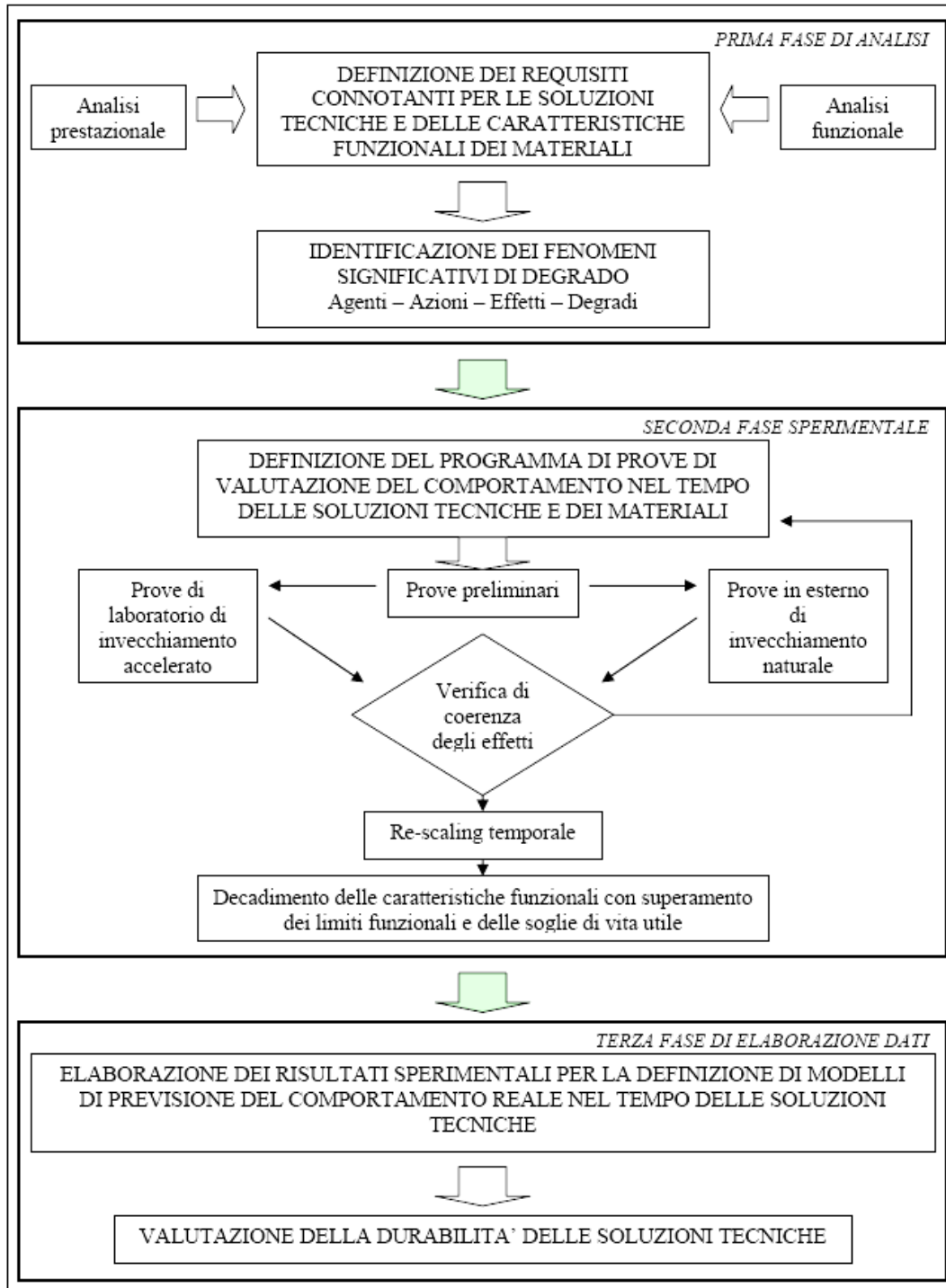


Figura 2 : Metodo di valutazione della durabilità dei componenti edilizi

## **2.1 I parametri di stima della durabilità**

Come detto in precedenza la durabilità esprime l'attitudine del sistema edilizio a mantenere nel tempo, senza interventi manutentivi, in determinate condizioni di uso e ambientali, il livello delle prestazioni tecnologiche iniziali.

Lo studio di tale requisito risulta complesso in quanto emergono in particolare due ordini di problemi connessi tra loro:

- l'obsolescenza tecnologica differenziata delle parti funzionali che costituiscono il sistema edilizio, dovuta alla differente connotazione oggettuale delle parti stesse e in relazione alle specifiche sollecitazioni dovute al contesto;
- il diverso decadimento prestazionale nel tempo delle diverse parti funzionali del sistema tecnologico.

Queste problematiche escludono una valutazione univoca dell'intero sistema edilizio, bensì impongono un'analisi dei singoli elementi edilizi considerata separatamente per ogni prestazione tecnologica significativa della specifica classe di elementi tecnici e riferita ad un determinato organismo edilizio e contesto territoriale.

La valutazione della durabilità si attiene essenzialmente a tre parametri fondamentali:

- affidabilità;
- tasso di guasto;
- vita utile (Service life).

### *2.1.1 Affidabilità*

Si definisce come la capacità di un oggetto di mantenere sensibilmente invariate nel tempo la propria qualità secondo precisate condizioni d'uso ovvero la probabilità che l'elemento o il sistema funzioni senza guastarsi per un certo tempo  $t$  e in predeterminate condizioni ambientali. Ne consegue che il valore dell'affidabilità è variabile nel tempo e che il modo di variare è diverso da componente a componente in base alle sue caratteristiche e modalità d'impiego.

L'affidabilità  $A_i$  all'istante  $t_i$  di un campione di  $N$  elementi omogenei tra loro e operanti nelle stesse condizioni è data da:

$$A = N - \frac{n_i}{N} \quad [1]$$

Dove  $n_i$  è il numero di elementi del campione che hanno subito avaria fino all'istante  $t_i$  compreso.

La funzione di distribuzione  $F_i$  rappresenta la probabilità che si verifichi un guasto fra i tempi  $t_0$  e  $t_i$  compreso, risulta:

$$F_i = 1 - A_i \quad [2]$$

## 2. Valutazione della Durabilità

L'affidabilità viene valutata secondo quattro componenti:

- affidabilità esecutiva relativa al grado di corrispondenza del componente "costruito" alle intenzionalità del progetto, attraverso l'analisi della complessità esecutiva del componente stesso;
- affidabilità inerente relativa al rischio di perdita di integrità funzionale del componente in seguito a variazioni dimensionali a fronte del contesto sollecitante;
- affidabilità critica relativa alla valutazione della compatibilità chimico-fisica tra i materiali costituenti il componente;
- affidabilità funzionale relativa all'equilibrio della distribuzione delle funzioni nel componente, attraverso l'analisi del modello funzionale dello stesso.

### 2.1.2 Tasso di guasto

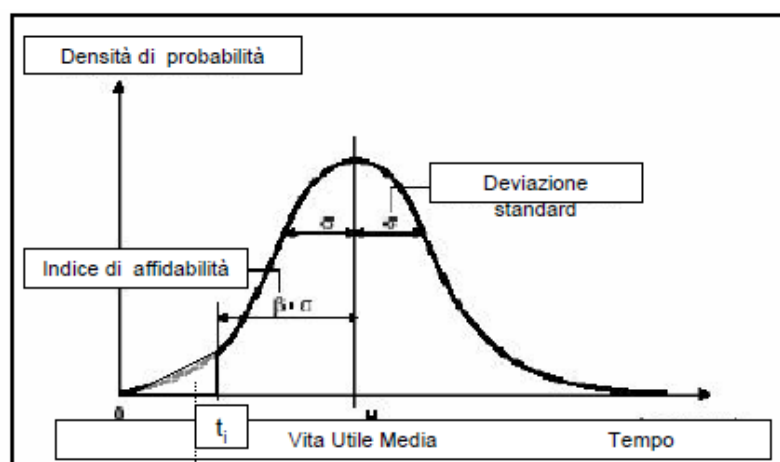
Il tasso di guasto rappresenta il numero di guasti che avvengono nell'unità di tempo valutato su un dato numero di elementi tecnologicamente omogenei.

In questo caso, la funzione di distribuzione assume il valore:

$$F_i = \frac{n_i}{N} \quad [3]$$

### 2.1.3 Vita Utile

La vita utile viene definita come il periodo di tempo dopo l'installazione durante il quale l'edificio o le sue parti mantengono livelli prestazionali superiori o uguali ai limiti di accettazione.



L'area sottesa dalla curva (integrale) fino al tempo  $t_i$  rappresenta la probabilità che non venga raggiunto il valore  $t_i$ , e viene chiamata probabilità di guasto

Figura 3 : Densità di probabilità relative alla vita utile

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

La durata spontanea del componente è il periodo di tempo durante il quale le prestazioni del componente si mantengono entro limiti accettabili per le esigenze di servizio sotto l'influenza dei soli agenti sollecitanti.

La normativa ISO introduce alcuni parametri particolari che articolano il contenuto di vita utile:

- vita utile di riferimento (Reference Service Life): vita utile dell'edificio o delle sue parti prevista in definite condizioni d'uso di riferimento;
- vita utile stimata (Estimated Service Life): vita utile dell'edificio o delle sue parti prevista in definite condizioni d'uso, calcolata correggendo le condizioni di riferimento in funzione dei materiali, del progetto, dell'ambiente, delle condizioni d'uso e di manutenzione;
- vita utile di progetto (Design Life): vita utile definita dal progettista.

## **2.2 Metodologia per la valutazione della vita utile di un elemento tecnico**

La valutazione della Vita Utile dei componenti edilizi risulta indispensabile per le attività di programmazione e di progettazione degli interventi edilizi, in particolare nella redazione dei capitolati, degli elaborati progettuali, delle relazioni tecniche e nelle fasi di controllo del progetto.

La normativa internazionale di riferimento sviluppata in ambito ISO TC 59 SC 14 Service Life Planning, più precisamente l'ISO 15686-1 e ISO 15686-2, introduce una metodologia per la valutazione della durabilità divisa in due parti:

- Si valuta la vita utile in condizioni di riferimento (Reference Service Life o RSL);
- Si valuta la vita utile stimata nelle condizioni di progetto (Estimated Service Life o ESL).

Il primo passo, ovvero la valutazione della durabilità in condizioni di riferimento è rappresentato dalla Figura 4 :

## 2. Valutazione della Durabilità

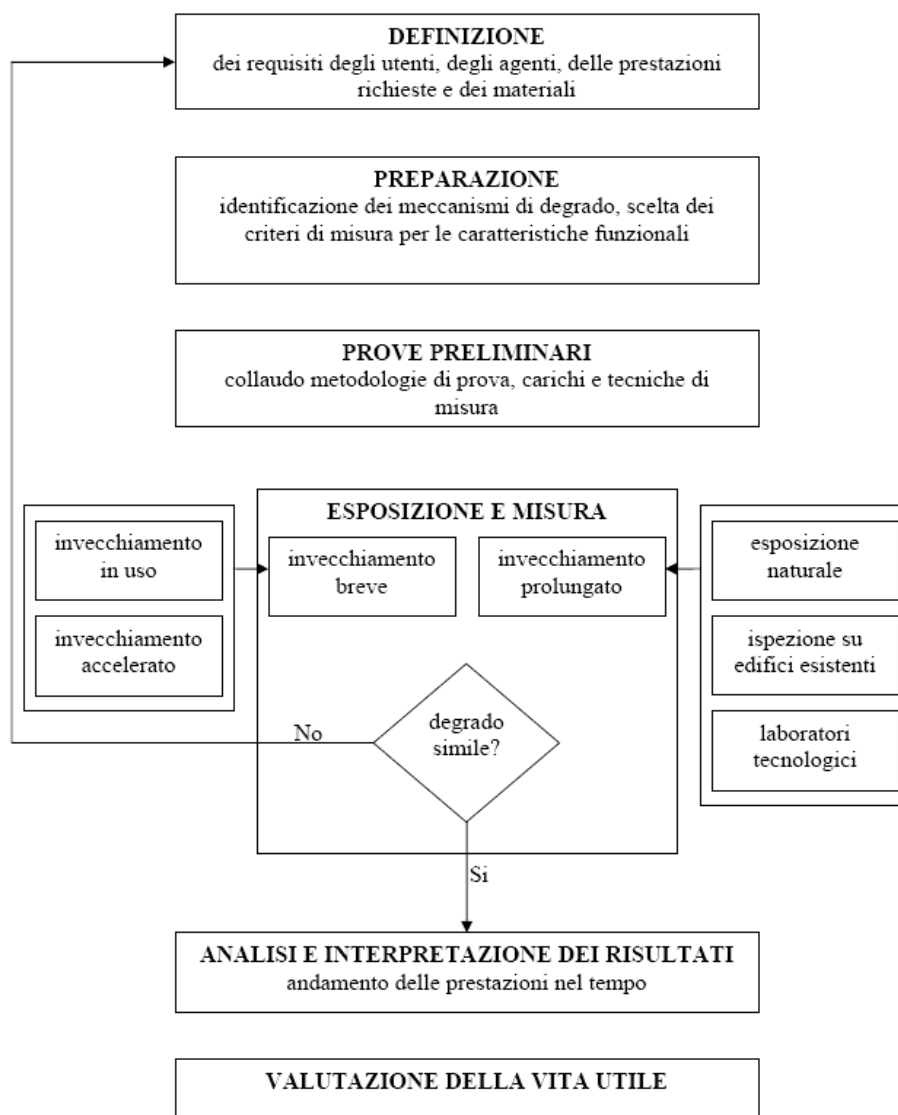


Figura 4 : Valutazione della vita utile di riferimento

Successivamente è necessario valutare la durata dell'intero organismo edilizio basandosi sulla norma ISO 15686, in modo da individuare la durata dei singoli componenti.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

La Tabella 1 sottostante mostra gli anni di vita utile prevista per varie categorie di edifici.

Tabella 1: Anni di vita utile per alcune categorie di edifici

CATEGORIE DI EDIFICIO	VITA UTILE ( ANNI )	ESEMPIO
Temporaneo	$T < 10$	Edifici per mostre temporanee, spazi per attività provvisorie, ...
Vita breve	$10 < T < 25$	Aule temporanee,...
Vita media	$25 < T < 50$	Edifici industriali,...
Vita lunga	$50 < T < 100$	Residenze, uffici, centri commerciali, scuole, parcheggi,...
Permanente	$T > 100$	Musei, monumenti,...

Stabilita la classe dell'edificio, si può ora passare ad analizzare i singoli elementi tecnici in funzione della loro facilità ed economicità di sostituzione.

La Tabella 2 fornisce alcuni dati a riguardo:

Tabella 2 : Vita utile di progetto per elementi tecnici

VITA UTILE DI PROGETTO	COMPONENTI INACCESSIBILI O STRUTTURALI	COMPONENTI PER I QUALI LA SOSTITUZIONE E' COSTOSA O DIFFICOLTOSA	COMPONENTI SOSTITUIBILI FACILMENTE	COMPONENTI IMPIANTISTICI
Illimitata	Illimitata	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

Una successiva rielaborazione delle valutazioni della Vita Utile secondo lo schema di Figura 4 serve per valutare la Vita Utile nelle condizioni effettive di progetto ESL.



## 2. Valutazione della Durabilità

Essa può essere effettuata con tre tipi di metodo differenti :

- Il metodo Fattoriale;
- Il metodo Statistico;
- Il metodo Ingegneristico.

Il metodo Fattoriale è soprattutto adatto per stime di massima ed è basato sul calcolo della ESL come prodotto della Vita Utile di Riferimento e di fattori che rappresentano gli aspetti che influenzano in negativo e in positivo la curabilità nel progetto in questione (ad esempio agenti legati alla qualità intrinseca del componente, agenti ambientali, agenti d'utilizzo, e condizioni come la qualità del componente, di progettazione, di esecuzione, d'uso, l'ambiente esterno e interno e il livello di manutenzione).

I metodi Statistici simulano il comportamento nel tempo in termini probabilistici.

Questo modello, più oneroso e complesso in quanto bisogna avere a disposizione una certa quantità di dati sperimentali, si utilizza soprattutto laddove bisogna garantire un livello elevato di sicurezza: infatti oggi sono utilizzati in prevalenza per le parti strutturali dell'edificio.

I metodi Ingegneristici sono una via di mezzo tra i due metodi sopracitati, consentono una simulazione abbastanza semplificata del comportamento nel tempo, tentando di garantire l'attendibilità del risultato, sulla base di modelli fisici dell'edificio oppure sulla base di risultati sperimentali.

Attualmente il CIBW80 RILEM sta elaborando un metodo sempre basato sul metodo fattoriale, ma dove i fattori sono calcolati su base statistica.

Infine un altro approccio di tipo ingegneristico reinterpreta gli aspetti che influenzano la durata i quali oggi sono espressi in fattori, e li traduce in una relazione funzionale, in considerazione dei modelli fisici di comportamento:  $RSL = f ( ESL, A, B, C, D, E, F, G )$ .

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

## **2.3 Normativa di riferimento**

Le prime norme esplicitamente ispirate alle tematiche della valutazione della durabilità risalgono al 1992 con la pubblicazione de "Guide to durability of buildings and building elements, products and components" (BSI 7543).

A livello internazionale, invece, il gruppo ISO TC59 SC14 "Service life planning" portava a termine le prime norme ISO della serie 15686:

- ISO 15686-1:2000 – *Buildings and constructed assets – Service Life planning – Part 1: general principles.*
- ISO 15686-2:2001 – *Buildings and constructed assets – Service Life planning – Part 2: Service Life Prediction Procedures.*
- ISO 15686-3:2002, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 3: Performance Audits and Reviews.*
- ISO 15686-5:2008 *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle Costing.*
- ISO 15686-6:2004, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 6: Procedures for considering Environmental Impacts.*
- ISO 15686-7:2006, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practise.*
- ISO 15686-8:2008 *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 8: Reference Service Life and Service Life Estimation.*

Le altre 3 parti di detta norma (inizialmente ne erano previste 9, ma in seguito si è ritenuto opportuno prevederne anche una decima) sono ancora in fase di elaborazione e trattano di:

- ISO DIS 15686-4: *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 4: Data requirements.* Questa specifica tecnica descrive i dati necessari per determinare la stima della Service Life dell'edificio o di un suo componente, attraverso vari metodi quali quello fattoriale descritto nella ISO 15686-1.
- ISO DIS 15686-9: *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 9: Guidance on assessment of Service Life data.*
- ISO DIS 15686-10: *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 10: Performance standards in building - Levels of functional requirements and levels for serviceability.*

Nel campo nazionale dal 2002 è stato istituito il Gruppo di lavoro 15 delle Commissioni Processo Edilizio e Prodotti e Sistemi Edilizi per mettere a punto la normativa tecnica di base per la valutazione della durabilità dei componenti edilizi.

Il gruppo ha recentemente ultimato il proprio progetto dal titolo "La valutazione della durabilità dei componenti edilizi" diviso nelle seguenti tre parti:

- Terminologia e definizione dei parametri di valutazione;
- Il metodo di valutazione della propensione all'affidabilità;
- Il metodo di valutazione della durata (vita utile).

## 3. ANALISI DELLA LETTERATURA

### 3.0 Introduzione

La durabilità dei materiali e dei componenti da costruzione dipende da una grande varietà di fenomeni che appartengono al campo della fisica degli edifici. Gli impatti dovuti alle intemperie sono parametri importanti che portano al degrado dell'involucro edilizio. Mentre alcuni carichi, come l'esposizione ai raggi UV dei materiali della facciata esterna, dipendono solo dalle condizioni locali esterne, altri parametri sono influenzati dalla costruzione stessa. In particolar modo la risposta igrotermica del sistema edilizio è governata da meccanismi di trasporto e accumulo. Il sottile strato esterno superficiale dei cappotti mostra maggiori fluttuazioni di temperatura e umidità relativa rispetto a strutture massicce. Anche il verificarsi di condizioni estreme dipende dai carichi esterni e dalle proprietà fisiche dei materiali: la radiazione solare può essere riflessa o assorbita, la pioggia può essere assorbita o scaricata.

E' largamente riconosciuto che i picchi di temperatura e umidità possono causare danni quando i limiti di sicurezza vengono superati. In ogni caso valori estremi non si limitano all'involucro dove possono essere misurati. I materiali esposti sul lato in cui soffia il vento e batte la pioggia spesso mostrano i valori massimi per quanto riguarda il contenuto d'acqua, rendendo quella zona vulnerabile al congelamento. Quindi, investigare sul comportamento igrotermico dell'involucro edilizio in risposta agli impatti ambientali circostanti, può aiutare a capire i processi di degrado ed aprire la porta a nuove procedure di valutazione e a prodotti edilizi più durevoli.

Secondo Künzle [2011] " Building Physics and Durability" sta crescendo la consapevolezza che la modellazione gioca un ruolo importante per la conoscenza dei processi di invecchiamento e degrado. Modelli per la simulazione del comportamento igrotermico in un involucro edilizio sono strumenti utili per il controllo dell'umidità degli edifici nuovi ed esistenti. Il modello, che è stato validato matematicamente, predice la distribuzione della temperatura, dell'umidità relativa e del contenuto d'acqua nel tempo e sviluppa il sistema per differenti climi interni e condizioni di esposizione esterne. Confrontare i risultati con specifici parametri limite è il primo passo per la salvaguardia della durabilità. In ogni caso molti processi di degrado dipendono da una varietà di parametri ed escludono semplici

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

interpretazioni. C'è la necessità di usare nuovi approcci che utilizzino i risultati delle simulazioni igrotermiche per ottenere rilevanti informazioni nell'ambito della durabilità. Si possono basare su esperienza a lungo termine o possono essere coinvolti nella preparazione di test di invecchiamento accelerato.

- Valutazione comparativa della Durabilità

Con la globalizzazione aumenta, da un paese all'altro, la domanda per l'esportazione di sistemi edilizi ben affermati. Se da una parte ci sono misurazioni fatte su lunghi periodi e riferimenti precisi sulla durabilità dati dall'esperienza nel paese di origine, dall'altra non si possono trasferire le stesse linee guida dei componenti per climi differenti senza ulteriori studi.

Utilizzando analisi climatiche e simulazioni igrotermiche è possibile confrontare il comportamento del sistema dipendente dal clima. Se le prestazioni igrotermiche complessive, così come i picchi rilevati sotto le nuove condizioni climatiche, sono simili a quelle del paese di origine, è molto probabile che il sistema può essere trasferito senza che provochi inaspettati problemi di durabilità. Se invece sono diversi, in particolar modo se gli estremi della temperatura e dell'umidità sono maggiori nelle nuove condizioni climatiche, sono necessari nuovi studi.

- L'importanza delle modellazioni igrotermiche come punto di partenza per i test di invecchiamento accelerato

Lo sviluppo di test accelerati ciclici si concentra sui picchi di carichi senza superare i reali estremi. Questo approccio empirico richiede solo un po' di intuito sui reali processi di degrado e invecchiamento. I carichi di temperatura, umidità relativa e contenuto d'acqua sono assunti come i maggiori responsabili dei processi di degrado dei materiali.

Questo significa che i periodi in condizioni moderate possono essere tagliati all'interno delle simulazioni, lasciando solo quelli dove capitano le condizioni estreme. Le condizioni di temperatura e umidità devono essere analizzate e piuttosto semplificate prima che vengano utilizzate come condizioni al contorno per i test accelerati. Il vantaggio di queste procedure è la semplicità; lo svantaggio è di dover fare test climatici artificiali e la scarsa affidabilità dei fattori di accelerazione. E' molto importante verificare i risultati dei test accelerati con i test sul campo e l'esperienza pratica.

Anche per Daniotti, Spagnolo e Paolini [2008] bisogna considerare dati climatici statistici per determinare gli eventi più critici ai fini di valutare la durabilità degli ETICS. Devono essere analizzati gli shock termici più severi, i raggi UV, la pioggia e il gelo, sia in inverno, che in estate e calcolata la loro ricorrenza, con lo scopo di ottenere cicli di invecchiamento da poter usare per i test in laboratorio, specifici per zona climatica presa in esame. Il primo passo è un'analisi ambientale per impostare l'intensità degli agenti da riprodurre e la loro frequenza nell'arco di un anno, definendo un ciclo. L'obiettivo è quello di definire un ciclo che sia il più simile possibile alle condizioni ambientali e di stress.

Un ciclo accelerato deve comprimere il tempo di invecchiamento e poter riprodurre solo gli eventi limite, ricercando l'intensità dei fattori critici per l'invecchiamento. Per esempio, valutando elevati shock termici in estate, prendere in esame le alte temperature, seguite da acquazzoni. Oppure per valutare le basse temperature superficiali in inverno, misurare i salti termici causati dalle nubi.

### 3. Analisi della Letteratura

Grazie a quest'analisi ambientale solo la frequenza degli eventi, rispetto ai limiti critici, può essere presa in considerazione. Questi eventi critici non hanno tutti la stessa intensità e non producono gli stessi effetti (Figura 5).

Nel caso dei materiali da costruzione con bassi valori critici, rispetto alla media delle condizioni ambientali, questo studio risulta essere molto importante.

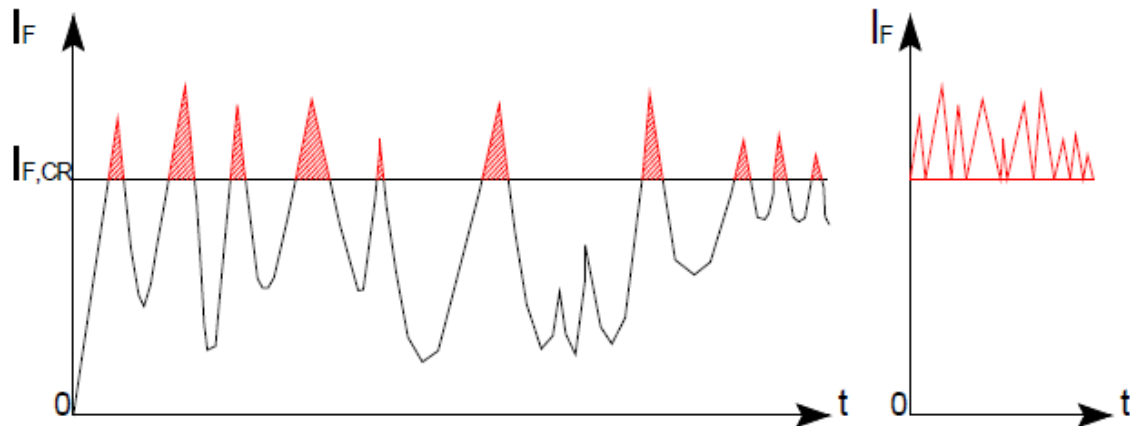


Figura 5: accelerazione di un tempo di invecchiamento, escludendo le parti non responsabili dell'invecchiamento, per un periodo di un anno.

## 3.1 Analisi climatiche comparate

Molti studi sul comportamento igrotermico degli ETICS sono stati condotti nei vari climi, per valutare le varie condizioni di fluttuazioni di temperatura ed umidità, comportamenti e meccanismi che si verificano sotto le diverse condizioni ambientali. Gli studi generalmente si concentrano sull'intensità e la frequenza con cui determinati eventi si verificano sull'intonaco esterno e sullo strato di isolante scelto con lo scopo di valutarne i danni sulla superficie come: crepe, screpolature e curvature. I principali responsabili di questi guasti sono le oscillazioni di temperatura e di umidità.

### 3.1.1 Influenza degli shock termici in differenti contesti climatici

#### - Analisi degli autori

Il vantaggio di un ETICS, secondo Carmeliet [2002] va al di là di un semplice abbassamento igrotermico degli sforzi e delle sollecitazioni in una parete. Lo strato di intonaco esterno è soggetto a grandi variazioni di temperatura. Sul periodo di un anno, la differenza tra la temperatura più bassa e la più alta raggiunge i 60°C per uno stucco bianco e gli 80°C per una colorazione più scura sul lato Sud-Ovest del muro.[data clima di Ukkel, Belgio (51° Nord)]. Su un giorno invece la differenza è di 36,8°C per il colore bianco e di 46,6°C per i colori scuri. Nannen e Gertis [1985] hanno condotto un'analisi degli sforzi dovuti a tali variazioni di temperatura sulla superficie esterna.

Hanno concluso che la variazione dei carichi termici da sola, non può spiegare i danni osservati sugli edifici. In nessuno dei casi testati, lo sforzo dato dalla variazione di temperatura aveva superato la resistenza a trazione dello stucco. Sempre secondo Carmeliet [1992] ha mostrato che la variazione di

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

umidità relativa nell'arco di una giornata sul lato esterno dell'intonaco, può invece spiegare un progressivo screpolamento. Mentre le oscillazioni di temperature giornaliere attraversano il sottile strato di intonaco esterno, non bagnano lo strato, i cambiamenti di umidità relativa invece penetrano lentamente e inumidiscono il materiale.

Questo genera sensibili curvature nello stucco, con trazioni alternate a compressioni sul lato esterno. Se le tensioni superano la resistenza a trazione nei punti più deboli, iniziano a formarsi le prime crepe, seguite da una crescita delle rotture è infine al danno. Un rete di rinforzo può ritardare parecchio l'inizio del danno. Infatti Carmeliet mostra che il rinforzo in entrambe le direzioni porta il rischio di danneggiamento nei primi 10 anni sotto al 9%. La rete di rinforzo dovrebbe essere inserita vicino alla superficie esterna. Sebbene colori scuri aumentano la temperatura superficiale dell'intonaco sotto gli apporti solari e porta a maggiori variazioni di umidità relativa sulla superficie, il colore ha un'importanza secondaria sul rischio di danno.

Il problema degli shock termici, non riguarda solo le alte temperature, ma anche quelle sotto gli 0°C.

Il clima finlandese per esempio differisce parecchio da quello dell'Europa Centrale. Per Pakkala, Suonketo [2011] uno dei problemi principali sono i cicli di gelo e disgelo che capitano durante gli anni. Il problema maggiore è quando il gelo e disgelo capita in condizioni ambientali umide. Cosa molto comune in autunno e in estate quando la temperatura giornaliera è leggermente sopra gli 0°C e scende di notte.

Altri problemi accadono nei giorni caldi invernali. Gli ETAG 004 ricoprono un grande range di prove per valutare l'idoneità del sistema. ma non includono gli attacchi da gelo. Invece i requisiti di resistenza al gelo sono presentati sotto forma di proprietà di assorbimento. Nel clima finlandese, i cicli di gelo e disgelo includono anche ambienti con aria umida, dovuti alla pioggia o alla neve.

La durabilità del gelo sulle facciate è un fattore molto importante nei problemi di durabilità, specialmente nei paesi con climi freddi, come la Finlandia. Quindi la separazione delle prove gelo-disgelo sui singoli materiali che compongono un ETICS e le prove con i climi più rigidi sono stati condotti usando nuovi tipi di materiali. Le prove includono due diversi cicli: calore e pioggia e calore e freddo.

In Finlandia, la stagione autunnale, invernale e primaverile includono spesso cicli di gelo e disgelo, alcune volte anche più volte durante lo stesso giorno. Come mostrato in Figura 2, i cicli di gelo e disgelo sono capitati 11 e 38 volte ( 27 volte di media ) all'anno, tra il 1961 e il 2006, utilizzando il data set dal " Meteorological Institute of Finland". I dati misurano la temperatura ogni volta che è scesa sotto gli 0°C, dopo che non ha piovuto per più di tre giorni.

### 3. Analisi della Letteratura

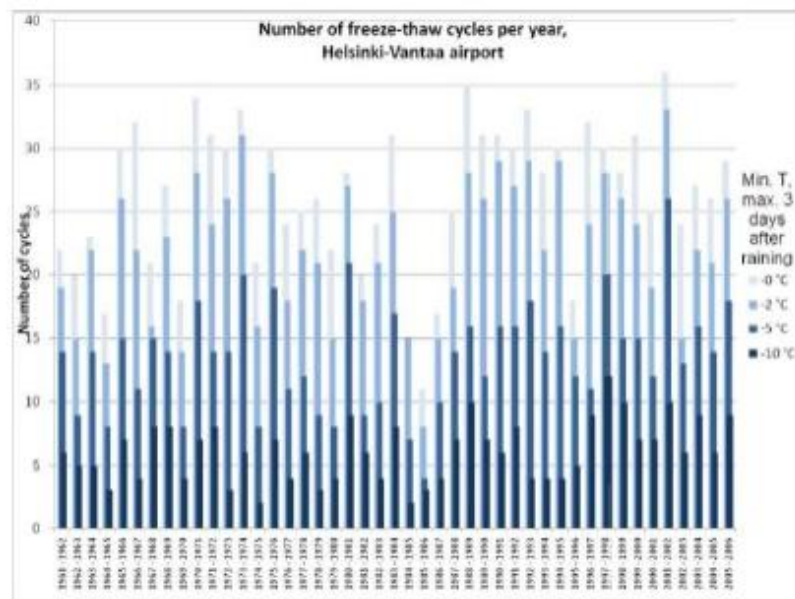


Figura 6: ciclo annuale di gelo e disgelo in Finlandia tra il 1961 e il 2006

Durante il corso di questi ultimi dieci anni, la maggior parte degli ETICS introdotti nel mercato finlandese sono stati testati con severi test ambientali, ripetendo cicli di otto ore includendo temperature che andavano da -20°C e veloci riscaldamenti fino a 60°C, bagnando le superfici.

Questo metodo “Finlandese” include 100 cicli e il metodo di giudizio dei test strutturali si basa sulla frequenza con cui si verificano i danni. Abbastanza spesso gli ETICS, in particolar modo sistemi importati da altri paesi, sono stati testati secondo gli ETAG 004 e non hanno superato le prove e si sono verificati molti danni a causa del gelo.

#### 3.1.2 Il comportamento degli isolanti in lana minerale negli ETICS a contatto con l'acqua

Il contenuto di umidità nella lana minerale è basso. Nelle strutture fibrose non si formano capillari che possano accumulare significativi quantitativi di vapore acqueo. Al massimo nelle resine potrebbe accumularsi un po' di vapore acqueo. Questo perchè la struttura fibrosa della lana minerale non ha assorbimento capillare. Per prevenire danni causati dall'accumulo di acqua in caso di contatto immediato, come nel caso di un forte acquazzone, la lana minerale viene resa idrofoba se utilizzata in edilizia.

Secondo Künzel e Zirkelbach [2009] che hanno studiato il comportamento della lana minerale negli ETICS, gli Isolanti in lana minerale, che si utilizzano o direttamente sul lato esterno degli edifici o in altri modi ben protetti dagli agenti atmosferici, hanno ampiamente dimostrato di essere duraturi e impermeabili.

I pannelli di isolanti in lana minerale non presentano assorbimento capillare, non possono quindi assorbire acqua quando messi a contatto con l'acqua. Questa proprietà è indipendente dal grado di idrofobia. Se idrofobi, i pannelli di lana minerale, vengono spruzzati su un lato, come nel caso in cui piove, così l'acqua può scendere all'interno delle fibre, a seconda della compattezza della struttura delle fibre, dalla densità e dall'effetto idrofobico. Lo stesso vale quando i pannelli di lana minerale vengono completamente immersi nell'acqua. Non c'è praticamente differenza tra i pannelli idrofobi e

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

non idrofobi per quanto riguarda l'assorbimento capillare. Non viene registrata nessuna differenza di umidità in termini di isolamento.

I materiali isolanti in fibre minerali sono esaminati dal punto di vista del loro comportamento igrotermico, in particolare valutando l'assorbimento liquido e la conduttività termica. Si nota che la forte dipendenza della conduttività termica dall'umidità si basa su misurazioni errate o interpretazioni sbagliate dei risultati, e che la conduttività di fibre idrofobe aumenta solo leggermente con il loro contenuto d'acqua. Visto che l'assorbimento capillare non c'è, gli autori concludono che nulla si oppone all'utilizzo di fibre idrofobe in un tetto rovescio o per l'isolamento, da un punto di vista della fisica dell'edificio.

Nel comportamento a lungo termine, i pannelli isolanti in lana minerale idrofobi e compressi, sono stati testati sotto condizioni ambientali naturali. Sono stati applicati sul lato Ovest di una casa di prova, in aperta pianura dal Fraunhofer Institute per la Fisica dell'edificio di Holzkirchen e lasciati esposti per cinque anni. Una parte è stata fornita con il rivestimento realizzato in fabbrica, l'altra è anche stata verniciata. La ricerca ha mostrato che i pannelli isolanti non sono solo resistenti all'acqua e stabili dimensionalmente, ma anche che con un contenuto di umidità inferiore a 2M.-%, garantiscono protezione termica sul lungo periodo.

Già nel 1998 l'invecchiamento artificiale, rispetto alle misurazioni fatte all'esterno ha portato ad una valutazione dei risultati irreali e sfavorevoli.

Gli studi mostrano anche come gli sforzi termici sullo strato superficiale con colori chiari di un ETICS, aumenta solo approssimativamente del 10-30% rispetto a una parete massiccia, molto meno di quanto fosse stato precedentemente ipotizzato. Al contrario, gli sforzi igroscopici aumentato per il sistema esaminato del 300%. Questo può portare all'insorgere di problemi, soprattutto per i sistemi con più strati di intonaco che hanno diverse proprietà elastiche.

Per quanto riguarda i danni all'intonaco, i sistemi minerali sono piuttosto vantaggiosi. E' stato mostrato come nei sistemi minerali anche con crepe sottili (fino al massimo 0,2 mm), non ci sono cambiamenti per quanto riguarda il contenuto di umidità nell'intero edificio. L'assenza di capillarità nelle fibre dei pannelli di lana minerale sia idrofobi che non, assicura protezione dalla pioggia battente, anche in caso di crepe sull'intonaco.

Nel complesso gli 82 ETICS analizzati con la lana minerale e intonaco minerale, così come i sistemi con le schiume, hanno garantito buona durabilità. 26 di quegli 82 sono stati ulteriormente studiati e descritti in modo differente, concentrando l'attenzione sulla formazione di crepe sull'intonaco.

La precedente valutazione positiva può comunque essere confermata. La maggior parte dei sistemi sono rimasti senza crepe visibili durante quel periodo; in alcuni casi crepe sottili si sono formate, distribuendosi in un'area che non ha ricadute per l'assorbimento dell'umidità.

Un'ispezione più approfondita di 12 dei 18 sistemi è stata effettuata. Per valutare le esperienze positive sui lunghi periodi di analisi rispetto alle facciate convenzionali con intonaco di gesso delle murature tradizionali; la miglior condizione delle superfici gesso può far stimare la durabilità dei sistemi in più di 60 anni, che è il doppio rispetto a quanto si riferisce frequentemente.

I benefici fisici delle fibre di lana minerale negli ETICS utilizzati nell'Europa Centrale aumentano sempre più, principalmente grazie alla diffusione dovuta alla struttura del materiale. Considerando l'essiccazione di una muratura con diversi ETICS si nota che quando si utilizzano isolanti con schiume rigide, la temperatura aumenta rispetto alla parete mostrata, ma la diffusione, importante per l'essiccazione verso l'esterno, è impedita dalla resistenza al vapore dell'isolante.

Utilizzando un EPS, rispetto alla muratura mostrata, c'è un tempo più lungo di essiccazione, minore usando la lana minerale. Per questo motivo per gli ETICS sarebbe preferibile utilizzare la lana minerale. In ogni caso, solo gli intonaci permeabili vengono usati per evitare l'accumulo di umidità all'esterno della lana minerale, sotto l'intonaco, in caso di piogge intense.



### 3. Analisi della Letteratura

Anche per Carmeliet [2002], la principale preoccupazione con gli ETICS è la penetrazione della pioggia, soprattutto quando portata dal vento bagna l'isolante termico e la muratura dietro. Straube [1998] sviluppa una teoria sul controllo della pioggia. Ogni costruzione è formata da una serie di strati. La pioggia che passa attraverso un primo strato, può accumularsi, essere drenata e/o trasmessa allo strato successivo.

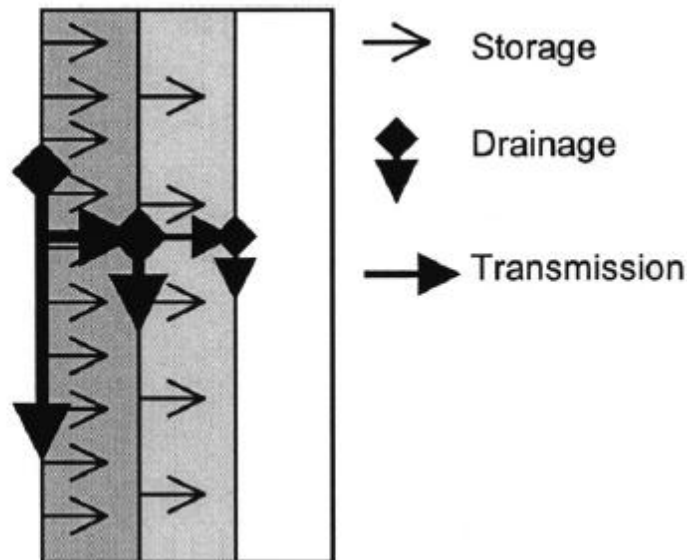


Figura 7: meccanismi di penetrazione della pioggia

Con gli ETICS lo strato esterno superficiale agisce come piano di drenaggio. Il coefficiente di assorbimento capillare dell'acqua  $A$  infatti è molto basso:  $0,012 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{kg}^{0,5})$  per l'intonaco a base polimerica (STO SILCO) e di  $0,015 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{kg}^{0,5})$  per l'intonaco minerale.

Anche per basse intensità di pioggia battente, il drenaggio comincia, subito dopo la pioggia colpisce la superficie esterna. (Figura 6)

L'intonaco stesso accumula un po' d'acqua. Una volta che arriva a saturazione capillare, può trasmettere un po' d'acqua all'isolante. Visto che gli isolanti di solito non presentano attività capillare, l'acqua non verrà aspirata e non ne verrà trasmessa all'intonaco di regolarizzazione. Solo quando l'acqua supera l'intonaco di base e l'isolante per gravità, l'intonaco di regolarizzazione potrà bagnarsi. In tal caso, i vuoti nell'intonaco si comportano simultaneamente come piano di drenaggio. Entrambi i meccanismi potrebbero inumidire la muratura dietro. I flussi gravitazionali si sviluppano in questa direzione in caso di dettagli non ben studiati. I nodi critici sono quello tra tetto e parete verticale e quelli della finestra. Le crepe nell'intonaco in corrispondenza dei giunti tra i pannelli dell'isolante facilitano la penetrazione della pioggia per gravità.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

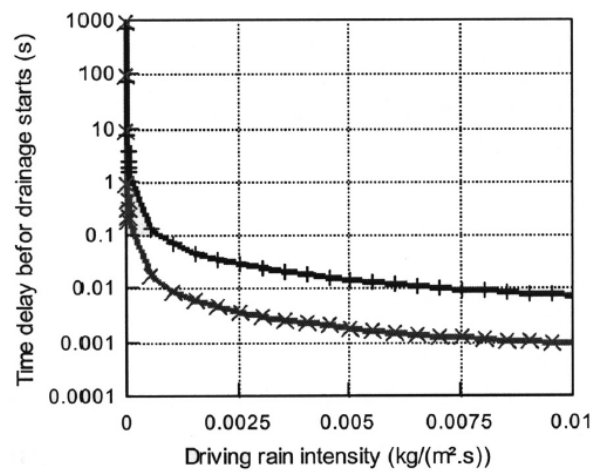


Figura 8: pioggia battente. ritardo di tempo prima che inizi il drenaggio per un intonaco a base polimerica

# 4. TRASPORTO DI CALORE E UMIDITÀ : TERMINI DI BASE E FORMULE IGROTERMICHE

## 4.0 Introduzione

L'obiettivo delle analisi igrotermiche è la valutazione della temperatura e le condizioni di umidità che possono prevalere attraverso una porzione o l'intero edificio nell'arco di tempo.

Lo scopo delle analisi igrotermiche è quella di fornire appropriate informazioni necessarie per prendere le corrette decisioni. Le tre ragioni principali per condurre un'analisi igrotermica sono:

- Sviluppo di un appropriato livello di conoscenza di quanta condensa si forma e in che condizioni, quando e dove, quando e dove comincia il decadimento.
- Identificare e/o evitare un problema come: condensa, decadimento, penetrazione della pioggia.
- Quantificare il flusso di energia e il suo impatto sul comfort e sugli impianti meccanici

Prima di effettuare un'analisi è meglio considerare la situazione in cui condurla. In molti edifici nessun'analisi viene richiesta perché la lunga e soddisfacente esperienza in quel campo e clima è sufficiente.

Analisi più dettagliate e precise sono spesso richieste quando il costo potenziale di un problema da risolvere è alto, un nuovo prodotto deve essere introdotto sul mercato o per dimostrare la conformità di un prodotto secondo gli organismi di attestazione. La valutazione delle performance igrotermiche di un edificio richiede la conoscenza di determinati parametri:

- Geometria dell'involucro (forma, altezza, dettagli costruttivi etc)
- Condizioni al contorno ( ambiente interno ed esterno; condizioni al contorno tra due elementi
- Proprietà dei Materiali
- Fisica del trasporto dell'aria, del calore e dell'umidità

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

- Livelli Prestazionali

Nelle situazioni pratiche, come i problemi di progettazione, i vincoli di soldi e tempo hanno un grosso impatto sulle approssimazioni e scelte fatte.

L'abilità di un modello di saper rappresentare le reali prestazioni dipende comunque da come tutti i parametri sono correlati tra di loro. Ognuna delle cinque categorie sopra elencate dipende anche da:

- Dimensione
- Tempo
- Qualità e disponibilità delle informazioni
- Provenienza dei dati forniti.

Il grado con cui questi fattori sono presi in considerazione è la misura della sofisticatezza e precisione del modello

## **4.1 Modello fisico**

Molti modelli sono stati sviluppati, partendo da alcuni molto semplici fino a quelli molto complessi, con l'ausilio della tecnologia a disposizione. Ogni modello si basa su diversi modi di modellare la fisica dell'umidità. Un approccio è quello di scegliere un parametro guida e raggruppare tutti i meccanismi in un'unica funzione di diffusione dell'umidità totale. Un altro approccio è quello di separare la diffusione al vapore dal trasporto liquido.

Nell'ultimo caso si può modellare il flusso sia in parallelo che in serie ( diffusione del vapore funziona fino a un certo contenuto di umidità, poi avviene il trasporto liquido). In realtà il flusso è in parallelo anche se in alcuni casi quello in serie è abbastanza accurato.

Quasi tutti i modelli usano una Moisture storage function media che non presenta fenomeni di isteresi.

Si può scegliere tra diversi parametri guida dell'umidità: Pressione di vapore, Umidità Relativa, Forze Capillari o Contenuto di Umidità.

Il problema della pressione di vapore è che definisce solo la diffusione di vapore e quindi non è usato da solo. lo svantaggio di usare il contenuto di umidità, pur fisicamente valido, è la discontinuità sull'interfaccia dei diversi materiali; stesso discorso vale per l'aspirazione capillare.

L'umidità relativa in realtà non definisce né il trasporto liquido, né quello di vapore, ma è continuo in un materiale composto.

Tutti i parametri possono essere legati tra di loro e usati con le appropriate trasformazioni.

La Diffusione Superficiale è considerata come un meccanismo di trasporto nello sviluppo di molti modelli. La Diffusione Superficiale può essere inclusa in modelli che usano diffusività di umidità misurate, ma gli effetti della temperatura vanno considerati e molti modelli usano proprietà di materiali che usano il flusso capillare per aspirazione. E' importante capire che il flusso di umidità non può essere semplicemente dato dalla diffusione al vapore o aspirazione capillare, ma agisce anche la Diffusione Superficiale e tutti questi tre meccanismi devono agire in contemporanea.

#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

Modelli di calcolo semplificati:

- FRAME 5.0
- THERM 2.1
- HEAT
- Metodo di GLASER
- ASHRAE
- WUFI: In questo modello la Diffusione Superficiale e il Trasporto Liquido sono guidati dall'umidità relativa (e l'aspirazione capillare è data dall'equazione di Kelvin). La diffusione del vapore è considerata separatamente. Tutte le proprietà dei materiali possono essere definite come una funzione del contenuto di umidità ( o U.R. ), possono essere inseriti se noti o misurati, oppure ricavati da Coefficiente di Assorbimento, Saturazione Capillare, Permeabilità al vapore.

Caratteristiche importanti del modello sono la facilità dell'uso, la stabilità dei calcoli, la capacità di utilizzare la pioggia battente come condizione al contorno, l'utilizzo di diverse diffusività liquide per le condizioni DRY, WET e Redistribution.

Il suo più grande limite è l'incapacità di trattare le perdite d'aria e i suoi relativi flussi di calore e umidità.

## 4.2 Dati di input

Sebbene la fisica del trasporto e accumulo di umidità è ben nota, predire le condizioni di temperatura e umidità all'interno dell'edificio non è semplice.

Ogni anno ci sono milioni di casi di danneggiamenti agli edifici dovuti al passaggio dell'acqua nei componenti edilizi. Questo vale sia per gli edifici antichi, esposti all'acqua per lungo, sia per quelli di nuova costruzione. Ma l'acqua non causa solo danni strutturali. Il valore dell'isolamento termico degli edifici può essere sensibilmente ridotto dall'umidità.

L'obiettivo dovrebbe dunque essere quello di tenere l'acqua lontana dall'involucro o diminuirne al massimo il suo contenuto.

L'umidità può influenzare un edificio allo stato liquido, come pioggia o acqua di risalita, come condensa del vapore acqueo a contatto con una superficie o all'interno del componente; se questo è formato da diversi strati la condensa in genere si forma all'interfaccia tra due strati. Si può anche rilevare un aumento del contenuto d'acqua durante la realizzazione di un elemento, ad esempio l'acqua utilizzata per il cemento o un intonaco, o l'infiltrazione di pioggia per la mancata tenuta dell'elemento nel processo di costruzione.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

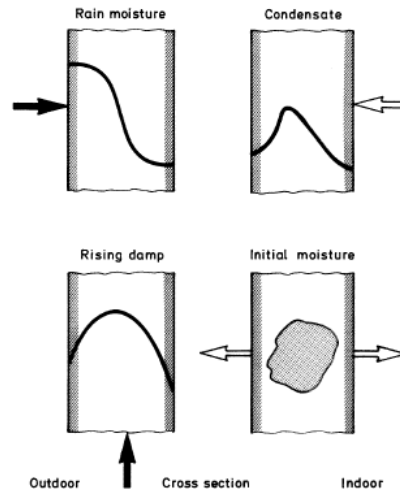


Figura 9 : Tipologia infiltrazioni d'acqua

A seconda delle diverse condizioni atmosferiche, l'umidità in un componente edilizio si può presentare sotto forma solida, liquida o gassosa. La somma di queste tre componenti verrà chiamata contenuto d'acqua totale  $w$ .

Un materiale può assorbire umidità fino a quando i suoi pori sono riempiti d'acqua, ma ciò non fornisce informazioni sufficienti sulla reale capacità di accumulo d'acqua in condizioni naturali. È importante quindi trovare una relazione tra il contenuto d'acqua di un materiale e le condizioni ambientali circostanti.

Il parametro climatico fondamentale per il calcolo dell'accumulo di umidità è l'*umidità relativa*.

Possiamo così distinguere nei materiali tre regioni di umidità:

- *Regione A* : regione igroscopica. Il range va dalla condizione asciutta fino all'equilibrio al 95% di umidità relativa, compresi tutti i contenuti d'acqua dall'assorbimento del vapore acqueo fino all'equilibrio.
- *Regione B* : regione super-igroscopica. Si parte dalla condizione precedente e si raggiunge l'equilibrio a saturazione (free water saturation).
- *Regione C* : regione supersatura. Non si può raggiungere con un normale aspirazione ma attraverso aspirazione sotto pressione. In questa regione, che si trova sopra la free water saturation, con U.R. sempre al 100% indipendentemente dal contenuto d'acqua, vengono riempite tutte le cavità e non si raggiungono altri stati di equilibrio.

#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

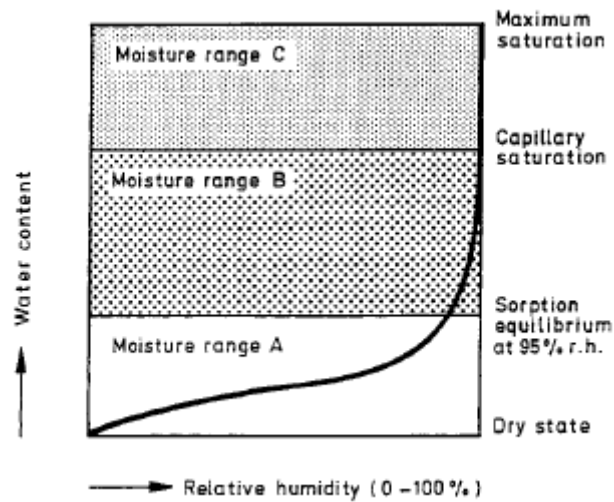


Figura 10: Diagramma della moisture storage function di un materiale igroscopico.

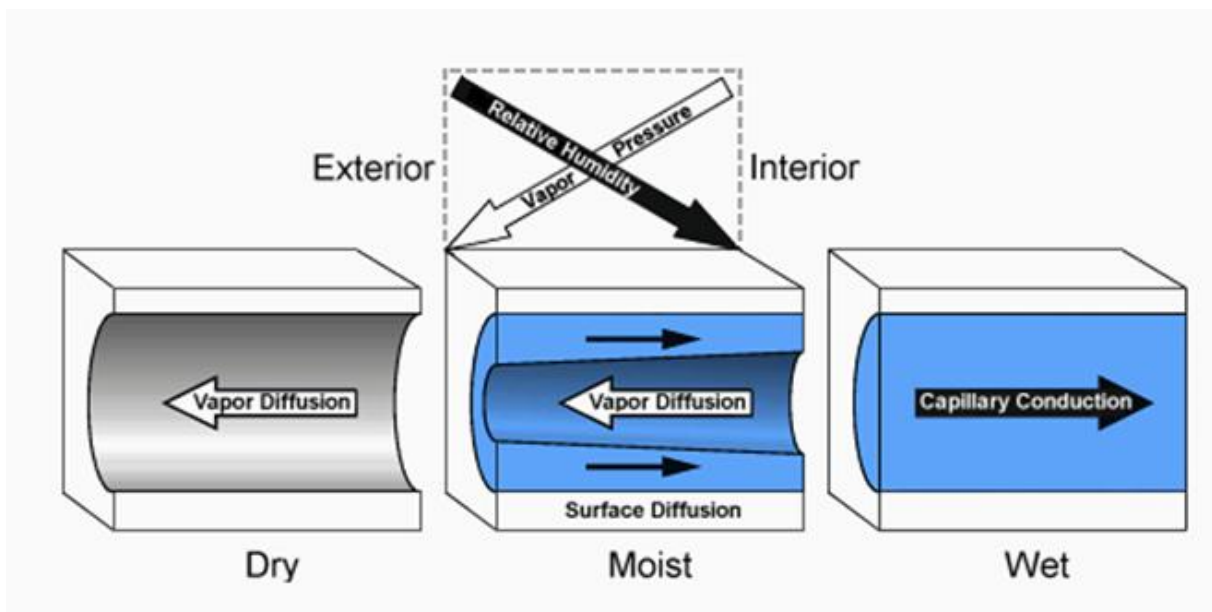


Figura 11 : Comportamento dell'acqua all'interno dei pori di un materiale

Parametri principali da inserire in WUFI per il calcolo:

- Densità di massa [ $\text{kg/m}^3$ ]
- Porosità [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]
- Calore specifico a secco [ $\text{J/kg}$ ]
- Conducibilità termica a secco [ $\text{W/mK}$ ]
- Fattore di permeabilità alla diffusione del vapore  $\mu$

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Descrizione:

- Densità di massa :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [4]$$

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità di massa  
 $m$  [kg] = massa  
 $V$  [m<sup>3</sup>] = volume del materiale

- Porosità : determina il contenuto d'acqua massimo (moltiplicando per la densità dell'acqua  $\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ )

$$n = \frac{V_{\text{pori}}}{V_{\text{tot}}} = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{reale}}} \quad [5]$$

$V_{\text{pori}}$  [m<sup>3</sup>] = volume dei pori presenti nel materiale  
 $V_{\text{tot}}$  [m<sup>3</sup>] = volume del materiale  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità di massa  
 $\rho_{\text{reale}}$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità di massa depurando il volume del materiale dei pori

- Calore specifico : viene usato il calore specifico di massa per il materiale a secco, dipende solo dalle proprietà chimiche del materiale e no dalla sua porosità. Per convertire il calore sp. di massa in calore sp. di volume (che sarà utilizzato nelle equazioni di trasporto) WUFI lo moltiplica per la densità.

$$c = \frac{Q}{m * \Delta T} \quad [6]$$

$c$  [J/kgK] = calore specifico  
 $Q$  [J] = calore  
 $m$  [kg] = massa  
 $\Delta T$  [K] = differenza di temperatura



#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

- Conducibilità termica a secco : è il rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio di calore. Misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore.

$$\lambda = \frac{Q * d}{S * (T_2 - T_1)} \quad [7]$$

$\lambda$ [W/mK]	= conducibilità termica
$Q$ [W]	= flusso di calore
$d$ [m]	= lunghezza dell'elemento considerato
$S$ [m <sup>2</sup> ]	= area della porzione di elemento considerato
$T_2$ e $T_1$ [K]	= temperature agli estremi dell'elemento

- Fattore di permeabilità alla diffusione del vapore  $\mu$

Secondo la UNI EN 12572 la permeanza  $i$  ( secco o umido) e il provino che ne copre l'apertura, posizionato in una camera climatica. Pesature periodiche del sistema di prova permettono di determinare la portata di vapore acqueo in condizioni stazionarie. In funzione di questa e della differenza di pressione del vapore è possibile determinare la permeanza igroscopica.

Per ogni coppia di pesature successive dei provini si calcola la velocità di variazione in massa  $\Delta m'_{12}$

$$\Delta m'_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad [8]$$

dove:

$\Delta m'_{12}$ [kg/s]	= variazione della massa nel tempo per una singola determinazione
$m_2$ [kg]	= massa del provino a $t_2$
$m_1$ [kg]	= massa del provino a $t_1$

Calcolando la retta di regressione tra massa e tempo, si trova la pendenza di questa retta che verrà chiamata  $G$  [kg/s].

La densità della portata del flusso del vapore acqueo  $g$  è data da :

$$g = \frac{G}{A} \quad [9]$$

dove :

$A$ [m <sup>2</sup> ]	= area esposta del provino
-----------------------	----------------------------

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

La permeanza igroscopica  $W$  è data da:

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} \quad [10]$$

dove:

$W$  [kg/m<sup>2</sup>sPa] = permeanza igroscopica

$\Delta p_v$  deve essere calcolato dalla media dei valori misurati di temperatura e umidità relativa durante la prova.

$$p_{sat} = \varphi \cdot 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \vartheta}{237,3 + \vartheta}} \quad [11]$$

La resistenza igroscopica è l'inverso della permeanza:

$$Z = \frac{1}{W} \quad [12]$$

La permeabilità igroscopica  $\delta$  è data da :

$$\delta = W \cdot d \quad [13]$$

dove:

$d$  [m] = spessore

Il fattore di resistenza igroscopico  $\mu$  è dato da :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad [14]$$

dove:

$\delta_a$  [kg/m<sup>2</sup>sPa] = permeabilità igroscopica dell'aria, rispetto alla pressione parziale del vapore

#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

e

$$\delta_a = \frac{0,083p_0}{R_w \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} \quad [15]$$

Altri parametri (dipendenti dall'umidità):

- Moisture storage function (funzione di accumulo di umidità)
- Coefficiente di trasporto liquido – coefficiente di assorbimento d'acqua per aspirazione
- Coefficiente di trasporto liquido – coefficiente di assorbimento d'acqua per redistribuzione
- Conducibilità termica dipendente dall'umidità
- Trasporto dell' umidità sotto la temperatura di congelamento
- Fattore di permeabilità alla diffusione del vapore dipendente dall'umidità (opzionale)
- Umidità tipica di cantiere [kg/m<sup>3</sup>] (opzionale)

Descrizione :

##### 4.2.1 *Moisture storage function*

I meccanismi principali per il calcolo del trasferimento di umidità nella fisica degli edifici sono: la diffusione del vapore acqueo e trasporto liquido tramite le forze capillari nel materiale.

Guardando la capillarità di elemento costruttivo notiamo che in condizioni invernali la temperatura all'interno dell'edificio e così anche la pressione di vapore, è più alta che all'esterno. Questo perchè l'umidità è spesso più elevata all'esterno e il gradiente dell'umidità relativa o il contenuto d'acqua va in direzione opposta. Se il componente edilizio è asciutto, la diffusione al vapore nei capillari va dall'interno all'esterno. L'acqua assorbita nel muro rimane immobile per le grandi forze di adesione.

E' necessario determinare con precisione la moisture storage function nel caso in cui un componente edilizio sia composto da diversi strati a contatto tra loro dove il trasporto liquido tra uno strato e l'altro svolge un ruolo importante.

Ci sono diverse formule empiriche approssimate per determinare la funzione di accumulo:

$$w = w_0 - \frac{\ln(1 - \varphi)}{d} \quad [16]$$

$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	= contenuto d'acqua all'equilibrio
$w_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	= contenuto d'acqua con U.R. = 0%
$\varphi$ [-]	= umidità relativa
$d$ [m <sup>3</sup> /kg]	= coefficiente di approssimazione

in questo caso il contenuto d'acqua per  $\varphi=0$  corrisponde al contenuto d'acqua all'equilibrio al 30% di U.R.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

e

$$w = w_m * \frac{1}{1 - \varphi} \quad [17]$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup>] = contenuto d'acqua all'equilibrio  
 $w_m$  [kg/m<sup>3</sup>] = contenuto d'acqua di un componente monostrato (calcolato con test di assorbimento)  
 $\varphi$  [-] = umidità relativa

Le due equazioni hanno il grosso problema di tendere all'infinito quando  $\varphi$  raggiunge il 100%. Per questo motivo viene usata la seguente formula approssimata per la determinazione della moisture storage function:

$$w = w_f * \frac{(b - 1) * \varphi}{b - \varphi} \quad [18]$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup>] = contenuto d'acqua all'equilibrio  
 $w_f$  [kg/m<sup>3</sup>] = contenuto d'acqua a saturazione  
 $\varphi$  [-] = umidità relativa  
 $b$  [-] = fattore di approssimazione

Il fattore  $b$  è sempre maggiore di 1; può essere determinato sostituendo nell'equazione il valore corrispondente al contenuto d'acqua all'equilibrio con umidità relativa pari all'80%.

Osservando i pori capillari nel componente edilizio, notiamo che in condizioni invernali la temperatura all'interno dell'edificio è superiore che all'esterno, è così anche la pressione di vapore è più alta dentro che fuori. Questo anche perchè l'umidità è di solito più alta all'esterno e il gradiente dell'umidità relativa o contenuto d'acqua viaggia in direzione opposta a quello della diffusione al vapore.

Se il componente è asciutto la diffusione al vapore nei pori va solo dall'interno all'esterno. L'acqua assorbita da un muro rimane immobile grazie alle forze di adesione; quando il quantitativo di umidità aumenta le pareti dei pori si ricoprono di uno strato d'acqua più spesso sul lato esterno, proprio perchè l'U.R è maggiore all'esterno.

Ma più spesso diventa lo strato, più diventano mobili le molecole d'acqua, spostandosi dallo strato più spesso a quello più sottile. Questa è la Diffusione Superficiale, così come la Conduzione Capillare, ed è parte del trasporto liquido, non della diffusione al vapore. All'interno di pori, la diffusione superficiale, che va in direzione opposta alla diffusione al vapore, riduce il trasporto di umidità dall'interno all'esterno.

La diffusione al vapore avviene principalmente nei pori più grandi, mentre il trasporto liquido, indipendentemente dalla diffusione al vapore, nei micropori e nei capillari

#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

##### 4.2.2 Diffusività del vapore acqueo

- Coefficiente di trasporto liquido di assorbimento per aspirazione

Per il calcolo del comportamento dell'umidità , i parametri addizionali sono spesso necessari per ottenere una buona approssimazione tra i risultati ottenuti attraverso le simulazioni e le misurazioni. Il trasporto liquido esercita una forte influenza sul comportamento dell'umidità. Per unità di tempo, può trasportare dieci volte più acqua all'interno del materiale della diffusione. La corretta determinazione del coefficiente di trasporto liquido è quindi molto importante. Una distinzione va fatta quando il materiale si bagna o si asciuga. Queste due condizioni al contorno producono due diversi coefficienti di trasporto liquido.

Il parametro per descrivere l'aspirazione capillare, caratteristico di un materiale da costruzione a contatto con l'acqua è il Coefficiente di assorbimento d'acqua A. tra il coefficiente A e il coefficiente di trasporto capillare a contatto con l'acqua  $D_{ws}$  c'è una relazione non univoca, perchè  $D_{ws}$  è dipendente dal contenuto d'acqua. L'incremento di  $D_{ws}$  con il contenuto di umidità può essere approssimato con una funzione esponenziale:

$$D_{ws}(w) = 3.8 * \left(\frac{A}{w_f}\right)^2 * 1000^{\frac{w}{w_f-1}} \quad [19]$$

$D_{ws}(w)$  [ $m^2/s$ ] = coefficiente di trasporto liquido per l'assorbimento  
 $A$  [ $kg/m^2s^{0.5}$ ] = coefficiente di assorbimento d'acqua  
 $w$  [ $kg/m^3$ ] = contenuto d'acqua  
 $w_f$  [ $kg/m^3$ ] = contenuto d'acqua a saturazione

Per determinare A vengono svolte specifiche prove in laboratorio sui provini in camera climatica, secondo la EN ISO 15148 "Prestazioni igrotermiche dei materiali e prodotti da costruzione-determinazione del coefficiente di assorbimento capillare attraverso immersione parziale".

Viene calcolata la differenza tra la massa di ogni pesata e quella iniziale :

$$\Delta m_t = \left(\frac{m_t - m_i}{A}\right) \quad [20]$$

dove:

$A$  [ $m^2$ ] = area di base del provino

e valutato rispetto al tempo di pesata  $\sqrt{t}$ , si trova:

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \quad [21]$$

dove:

$A_w$  [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>] = coefficiente di assorbimento d'acqua  
 $t_f$  [s] = tempo del test

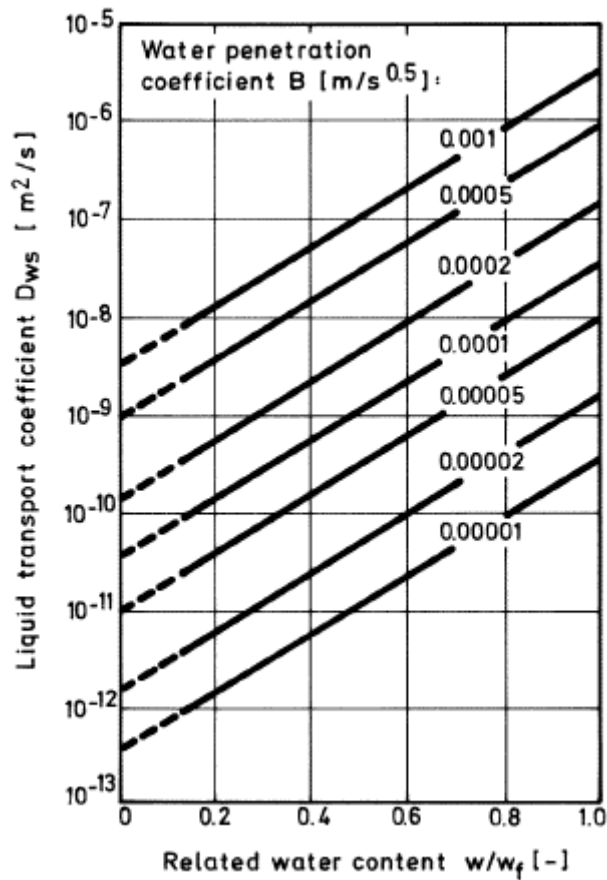


Figura 12: Dipendenza del coefficiente di trasporto capillare per aspirazione nel contenuto d'acqua e coefficiente di penetrazione dell'acqua per i materiali da costruzione, determinato attraverso.

Un altro metodo per calcolare il coefficiente di trasporto capillare, secondo [Krus\_Simple Methods to approximate the Liquid transport coefficient describing the absorption and drying\_] con una funzione esponenziale è:

$$D_w(u) = D_{w0} * e^{\left(\frac{u}{u_f} \ln \frac{D_{wf}}{D_{w0}}\right)} \quad [22]$$

#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

dove:

$D_{wf}$  [m<sup>2</sup>/s] = coefficiente di trasporto nella saturazione capillare  
 $D_{w0}$  [m<sup>2</sup>/s] = coefficiente di trasporto nella fase di assorbimento

- Coefficiente di trasporto liquido di assorbimento per redistribuzione

Per analogia del coefficiente di assorbimento, le osservazioni sul comportamento per assorbimento, ci fornisce informazioni sul coefficiente di trasporto liquido per Ridistribuzione. L'aspirazione di un materiale edilizio poroso a saturazione può essere diviso in diverse fasi. Fino a quando il trasporto capillare è abbastanza grande da trasportare un sufficiente quantitativo d'acqua sulla superficie dei pori, sotto condizioni al contorno esterne costanti, le caratteristiche del materiale non hanno nessuna influenza. In questa fase, la velocità di aspirazione dipende solo dalle condizioni esterne. Non appena il trasporto capillare all'interno del materiale si riduce, con la diminuzione del quantitativo d'acqua, la quantità di liquido trasportato dal trasporto superficiale, non sarà in grado di mantenere l'iniziale velocità di aspirazione. Come risultato si osserva un decadimento della velocità di aspirazione. La velocità in questa fase non dipende più dalle condizioni al contorno esterne, ma anche dal fattore di resistenza al vapore e dal coefficiente di trasporto liquido per Ridistribuzione.

##### 4.2.3 Conducibilità termica dipendente dall'umidità

Mentre l'evaporazione e la condensazione dell'umidità trasportata contribuiscono al trasporto di calore, non vale per l'equazione della conduzione termica.

$$\lambda(w) = \lambda_0 * (1 + b * \frac{w}{\rho_s}) \quad [23]$$

$\lambda(w)$  [W/mK] = conducibilità termica con presenza di umidità nei materiali da costruzione  
 $\lambda_0$  [W/mK] = conducibilità termica del material asciutto  
 $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità di massa material asciutto  
 $b$  [%/M.-%] = aumento percentuale della conducibilità termica

##### 4.2.4 Trasporto dell'umidità sotto la temperatura di congelamento

La formazione di ghiaccio nei materiali da costruzione con alti livelli di umidità possono bloccare la diffusione al vapore. La resistenza al vapore cambia un po' con la formazione del gelo fino al 60% di riempimento dei pori. Il gelo penalizza soprattutto il trasporto liquido che il trasporto di vapore. Sotto gli

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

0°C non c'è aspirazione capillare. ma l'acqua all'interno dei micropori congela solo alle temperature più basse, così che anche al di sotto degli 0°C, il trasporto liquido può avvenire con poca interferenza del ghiaccio nei pori più grandi. L'umidità relativa calcolata appena sopra i menischi formati dall'acqua nei pori, calcolata rispetto il raggio dei pori con l'aiuto dell'equazione di Kelvin, è chiamato potenziale limite di congelamento ed è dipendente dalla temperatura.

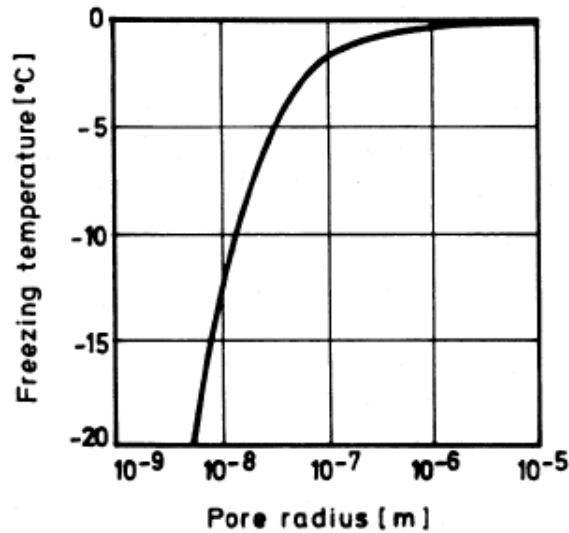


Figura 13 : Relazione raggio dei pori – temperature di congelamento

### 4.3 Equazioni di Trasporto

Le equazioni per il bilancio di calore e umidità sono strettamente legate tra di loro attraverso la dipendenza dall'umidità dell'entalpia, della conducibilità termica, dalle fonti di calore e attraverso la dipendenza della temperatura dai flussi di umidità. Possono essere risolte insieme solo quando il numero delle variabili in entrambe le equazioni si limita a due. Le due variabili, dalle quali tutte le altre possono essere ricavate mediante semplici relazioni, sono la temperatura e l'umidità relativa. Così otteniamo le seguenti equazioni per il contemporaneo trasporto di calore e umidità:

$$\frac{dH}{d\vartheta} * \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla * (\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla * [\delta_p \nabla * (\varphi p_{sat})] \quad [24]$$

$$\frac{dw}{d\varphi} * \frac{\delta \varphi}{\delta t} = \nabla * [D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})] \quad [25]$$

dove:

$dH/d\vartheta$  [J/m<sup>3</sup>K] = capacità di accumulo del calore nei materiali da costruzione umidi



#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

$dw/d\varphi$ [kg/m <sup>3</sup> ]	= capacità di accumulo dell'umidità nei materiali da costruzione umidi
$\lambda$ [W/mK]	= conduttività termica dei materiali da costruzione umidi
$D\varphi$ [kg/ms]	= coefficiente di conduzione liquida dei materiali da costruzione umidi
$\delta_p$ [kg/msPa]	= permeabilità igroscopica
$h_v$ [J/kg]	= entalpia di evaporazione
$p_{sat}$ [Pa]	= pressione di vapore a saturazione
$\vartheta$ [°C]	= temperatura
$\varphi$ [-]	= umidità relativa

La pressione di vapore di saturazione si calcola con la seguente formula empirica funzione della temperatura:

$$p_{sat} = 610,5 * e^{\left(\frac{17,269*\vartheta}{237,3 + \vartheta}\right)} \quad [26]$$

La variazione di entalpia, così come quella dell'umidità nel volume di un elemento è definito dalla differenza dei flussi di calore o umidità attraverso una superficie dell'elemento e i contributi o le perdite nell'elemento. Per quanto riguarda il calore :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla * q + S_h \quad [27]$$

$H$ [J/m <sup>3</sup> ]	= entalpia totale
$q$ [W/m <sup>2</sup> ]	= densità di flusso del calore
$S_h$ [W/m <sup>3</sup> ]	= sorgente o perdita di calore

con :

$$H = H_s + H_w \quad [28]$$

$H_s$ [J/m <sup>3</sup> ]	= entalpia del materiale asciutto
$H_w$ [J/m <sup>3</sup> ]	= entalpia del materiale umido

$$q = -\lambda \nabla \vartheta \quad [29]$$

$q$ [W/m <sup>2</sup> ]	= densità di flusso del calore
$\lambda$ [W/mK]	= conduttività termica dei materiali da costruzione umidi
$\vartheta$ [°C]	= temperature

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

$$S_h = -h_v * \nabla * g_v \quad [30]$$

$S_h$  [J/m<sup>3</sup>s] = sorgenti/perdite di calore per condensazione / evaporazione  
 $h_v$  [J/kg] = calore latente  
 $g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] = densità di flusso della diffusione al vapore

Il calore latente di transizione di fase è l'entalpia di evaporazione specifica dell'acqua pura ( $h_v = 2500$  kJ/kg) e l'entalpia di assorbimento dipende dal materiale. In ogni caso, quest'ultima con un U.R.  $\geq 50\%$  è trascurabile nella maggior parte dei materiali da costruzione rispetto all'entalpia di evaporazione.

La densità di flusso della diffusione al vapore  $g_v$  si calcola con l'equazione di bilancio di umidità, che analogamente all'equazione equazione di bilancio di calore precedente può essere espressa come :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla * (g_w + g_v) + S_w \quad [31]$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup>] = contenuto d'acqua dello strato del materiale da costruzione  
 $g_w$  [kg/m<sup>2</sup>s] = densità di flusso del trasporto liquido  
 $g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] = densità di flusso della diffusione al vapore  
 $S_w$  [kg/m<sup>3</sup>s] = sorgenti o perdite di umidità

dove:

$$g_v = D_m \nabla m + D_t \nabla T \quad [32]$$

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] = densità di flusso della diffusione al vapore  
 $m$  [-] = frazione massa del contenuto d'acqua rispetto alla massa totale di vapore acqueo nell'aria  
 $D_m$  [kg/ms] = coefficiente di diffusione riferito alla massa  
 $D_t$  [kg/msK] = coefficiente di Termodiffusione riferito alla massa

La diffusione dovuta dalla differenza della frazione di massa si chiama Diffusione di Fick. La termodiffusione, che si basa sul gradiente di temperatura, chiamato effetto Soret; è trascurabile nei componenti edilizi.

Così come nei gas ideali c'è proporzionalità tra la frazione di massa di un elemento e la sua pressione parziale, la diffusione del vapore acqueo nell'aria può essere rappresentata per motivi pratici dalla seguente equazione:

#### 4. Trasporto di Calore e Umidità : Termini di base e Formule Igrotermiche

$$g_{v=} - \delta \nabla p \quad [33]$$

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] = densità di flusso della diffusione al vapore  
 $\delta$  [kg/msPa] = coefficiente di diffusione al vapore nell'aria  
 $p$  [Pa] = pressione parziale del vapore acqueo

dove :

$$\delta = 2,0 \cdot 10^{-7} T^{0,81} \frac{2,0 \cdot 10^{-7} T^{0,81}}{P_l} \quad [34]$$

$T$  [K] = temperatura ambiente  
 $P_l$  [Pa] = pressione ambientale

Solo all'interno dei pori più grandi dei materiali da costruzione, è possibile paragonare la diffusione al vapore, con quella del vapore acqueo nell'aria. Quando i pori sono così piccoli che le collisioni tra le molecole e le pareti dei pori, sono maggiori di quelle tra le molecole stesse, stiamo parlando di effusione.

Per quanto concerne la fisica dell'edificio, gli effetti delle microstrutture e le interazioni di effusione e diffusione di Fick nei meccanismi di trasporto del vapore acqueo attraverso i pori, si può accettare un coefficiente di resistenza al vapore acqueo, caratteristico di ogni materiale da costruzione.

$$g_{v=} - \frac{\delta}{\mu} \nabla p \quad [35]$$

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] = densità di flusso della diffusione al vapore  
 $\delta$  [kg/msPa] = coefficiente di diffusione al vapore nell'aria  
 $p$  [Pa] = pressione parziale del vapore acqueo  
 $\mu$  [-] = fattore di resistenza alla diffusione vapore acqueo

Il fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo rappresenta il quoziente tra il coefficiente di diffusione del vapore acqueo nell'aria e quello del materiale da costruzione ed è indipendente dalla temperatura. Il fattore di resistenza alla diffusione di molti materiali da costruzione nelle regioni di assorbimento di umidità può essere considerato costante. Considerando che in quella regione di assorbimento umido il trasporto liquido e di vapore prendono il largo, indipendentemente l'uno dall'altro. Nelle regioni di acqua capillare non possiamo dire con certezza che l'indipendenza rimane tale. Infatti in questa fase i pori dei materiali si riempiono d'acqua e il trasporto liquido può essere ostruito o accelerato attraverso l'acqua e questo dipende dalla temperatura e dal quantitativo di

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

umidità all'interno dei pori. in zone con alte temperature e umidità relativa bassa, la diffusione al vapore è accelerata dalla presenza dell'acqua nei pori, mentre ad alti gradienti di umidità è ostruito. Questo effetto non può essere quantificato, perchè è un fenomeno che capita solo ad alti contenuti d'acqua, dove la conduzione capillare domina sulla diffusione al vapore.

Il secondo elemento che descrive questa equazione che descrive il trasporto capillare:

con :

$$g_w = -D_\varphi * \nabla\varphi \quad [36]$$

$D_\varphi$  [kg/ms] = coefficient di conduzione liquida  
 $\varphi$  [-] = umidità relativa

# 5. CASI DI STUDIO : ANALISI IGROTERMICHE CON SOFTWARE WUFI

## 5.0 Approccio alle analisi

Per valutare il comportamento di un determinato ETICS soggetto alle differenti condizioni climatiche presenti nel sud dell'Europa presentiamo un'analisi su alcune città italiane, spagnole, portoghesi, francesi, svizzere, greche e turche.

Le città scelte per l'analisi sono state classificate utilizzando la norma ISO 15686-7 che suddivide l'Europa in diverse fasce climatiche che vanno da 35° di Latitudine Nord ai 70° di Latitudine Nord, comprendo un ampio range di differenti condizioni climatiche. Le maggiori sono quelle tra le temperature ambiente e la differenza di radiazione solare nelle diverse localizzazioni. La combinazione di questi fattori rivela che il rapporto tra le reazioni chimiche che avvengono possono essere dell'ordine di 1:4 tra il Sud e il Nord dell'Europa.

Le tre fasce climatiche sono:

- zona A ( condizioni di Inverno freddo con una media delle temperature inferiore a 0°C e in Estate temperature che raramente raggiungono i 30°C);
- zona B ( Inverni moderati con frequenti gelate e media delle temperature compresa tra 0°C e 5°C ed Estati dove a volte si superano i 30°C)
- zona C ( Inverni caldi con media delle temperature superiore ai 5°C e Temperature estive frequenti sopra i 30°C e occasionalmente anche sopra i 40°C).

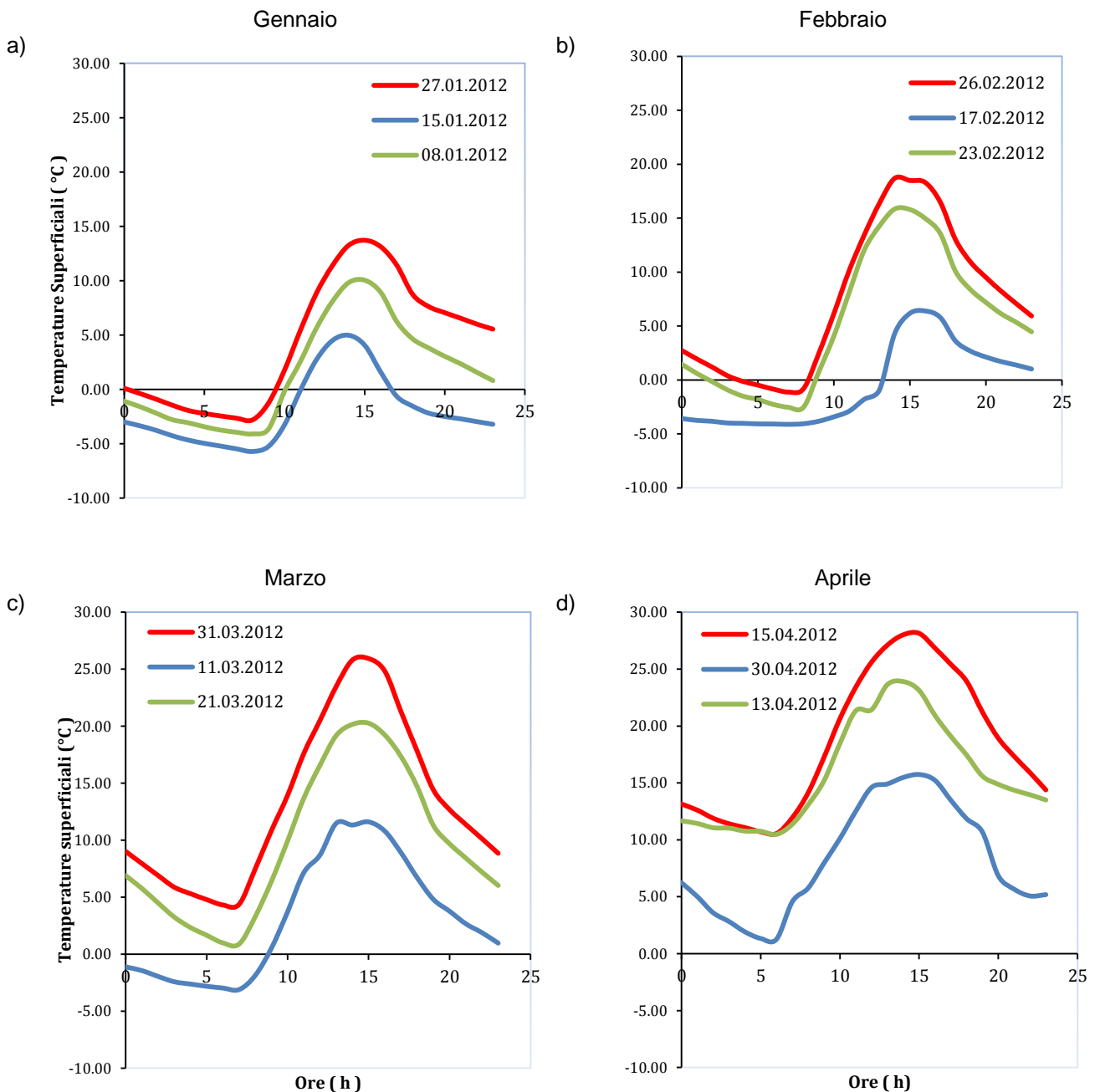
Interessandoci del Sud dell'Europa rientriamo nelle zone B e C anche se le città Svizzere e del Nord Italia hanno inverni freddi.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

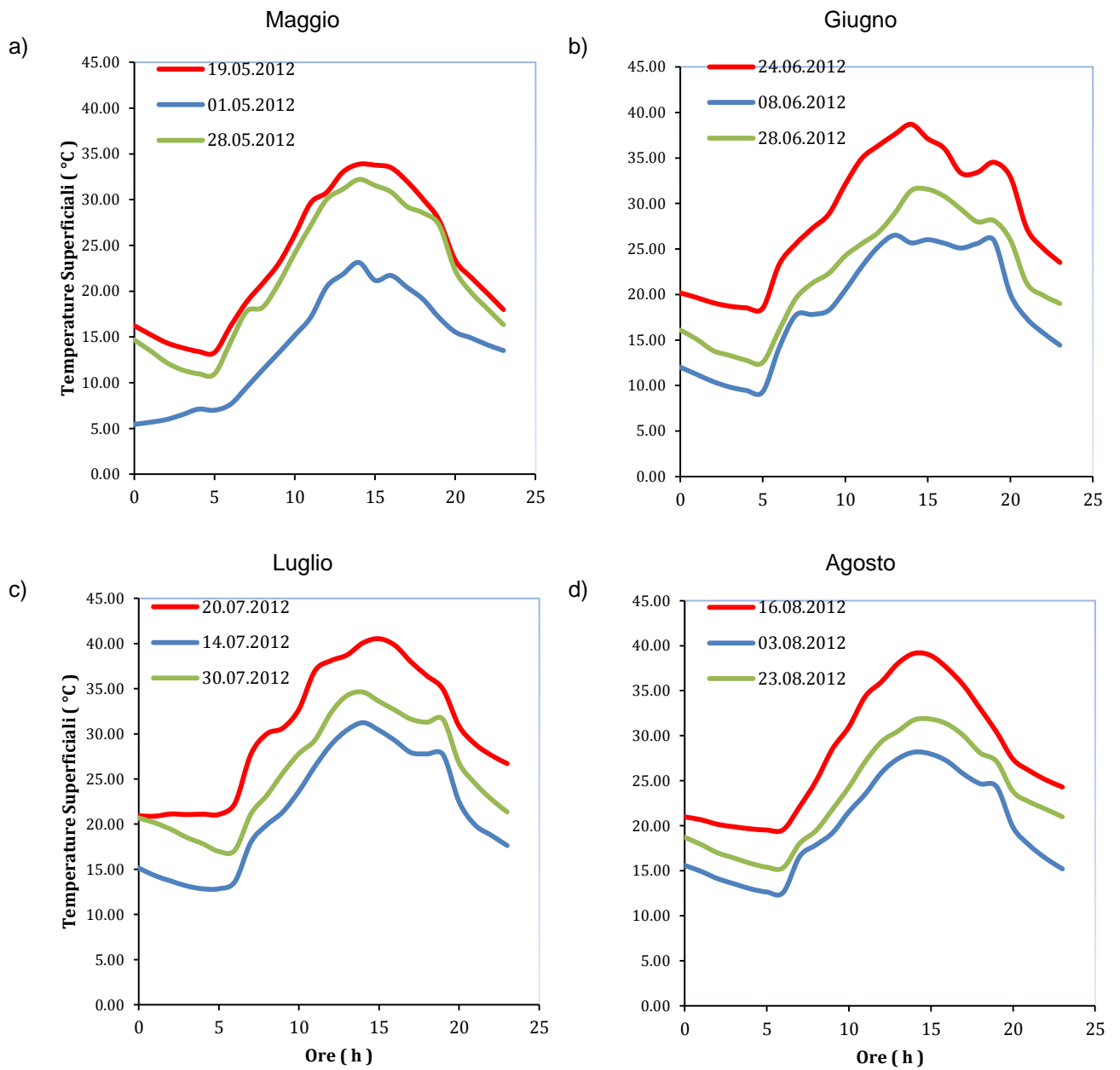
Il livello di deterioramento di un materiale può essere correlato direttamente agli andamenti climatici delle diverse zone e alle sue specifiche caratteristiche. Anche la presenza di umidità all'interno dell'ETICS, a seconda del clima in cui si trova, porterà a diversi tipi di danni, formazioni microbiche, efflorescenze o distaccamenti.

WUFI una volta inseriti tutti i dati di input (stratigrafia, proprietà dei materiali, condizioni al contorno, e file climatico) e avviata la simulazione, restituisce in una sola volta tutti i dati orari che si vogliono conoscere : temperature esterne, superficiali, contenuti d'acqua, i flussi di calore, i flussi di umidità...

Milano\_Nord\_α=0,5\_Profilo delle Temperature Superficiali



5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

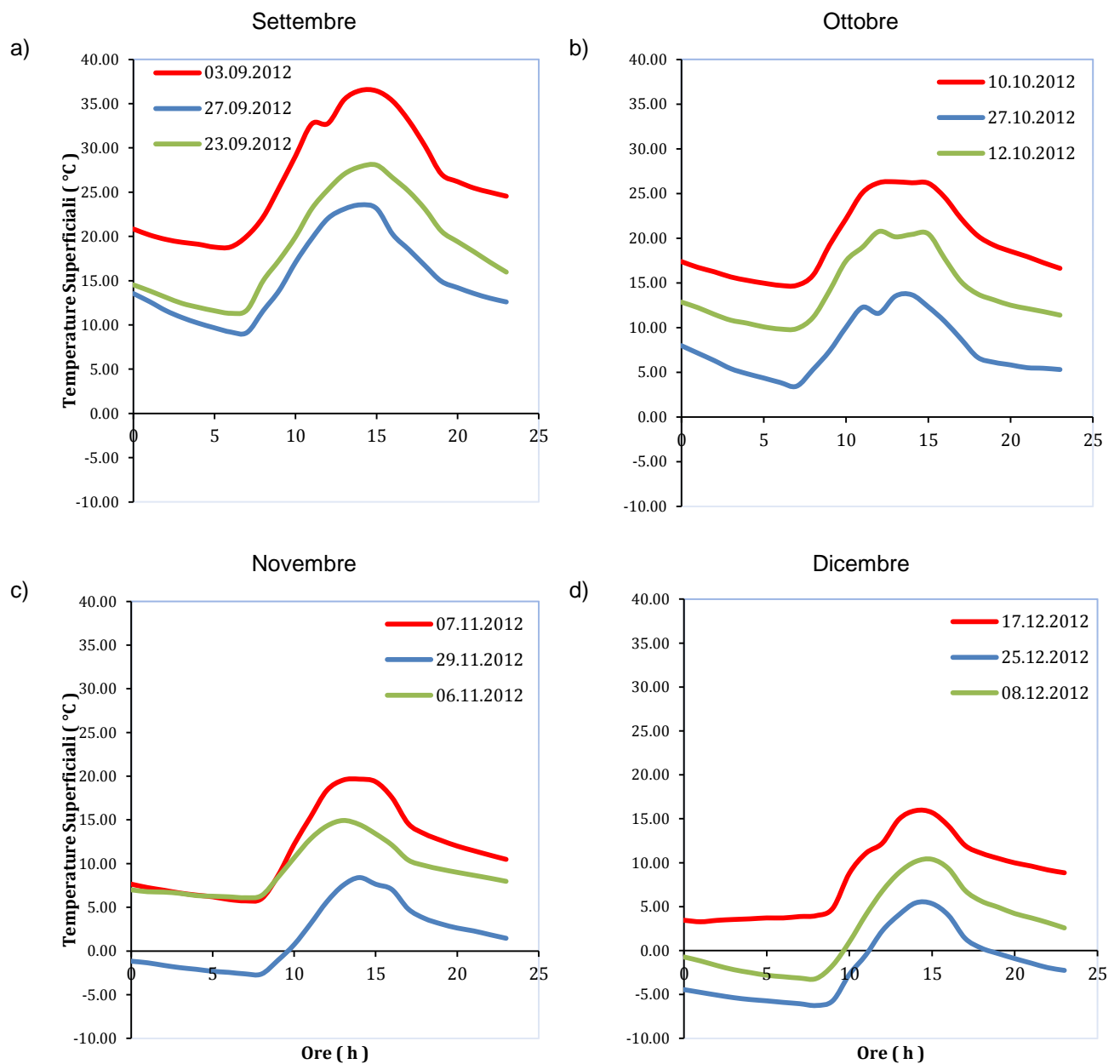


Figura 14 : Esempio di andamento delle temperature superficiali esportato da WUFI

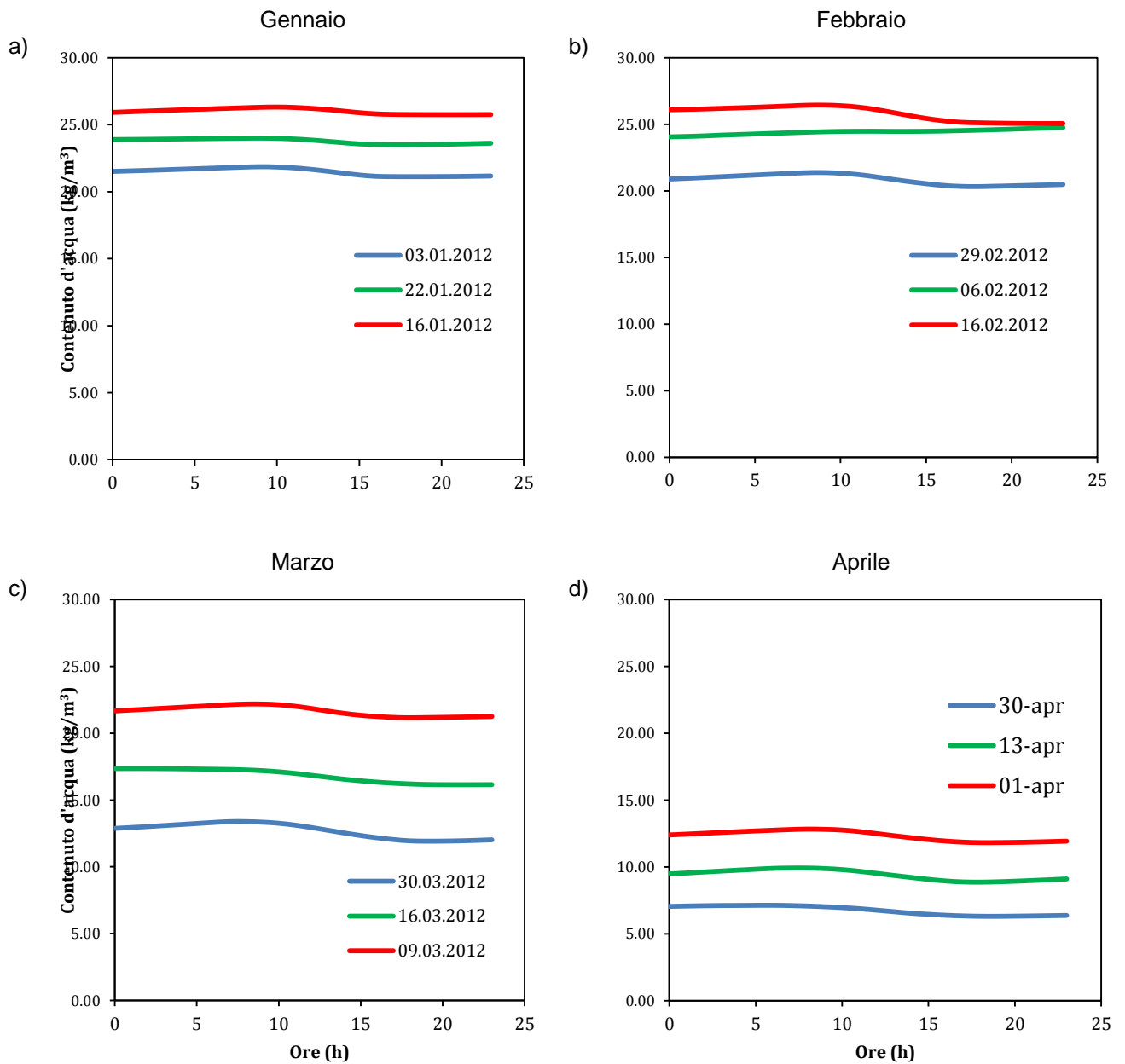
I grafici mostrano l'andamento delle temperature superficiali misurate con WUFI per la città di Milano, esposizione Nord e coefficiente di assorbimento solare  $\alpha=0,5$ .

Le tre funzioni in ciascun grafico rappresentano i profili sulle 24 ore dei tre giorni in cui è stata misurata la temperatura superficiale massima (rosso), minima (blu) e media (verde) nel mese di riferimento.

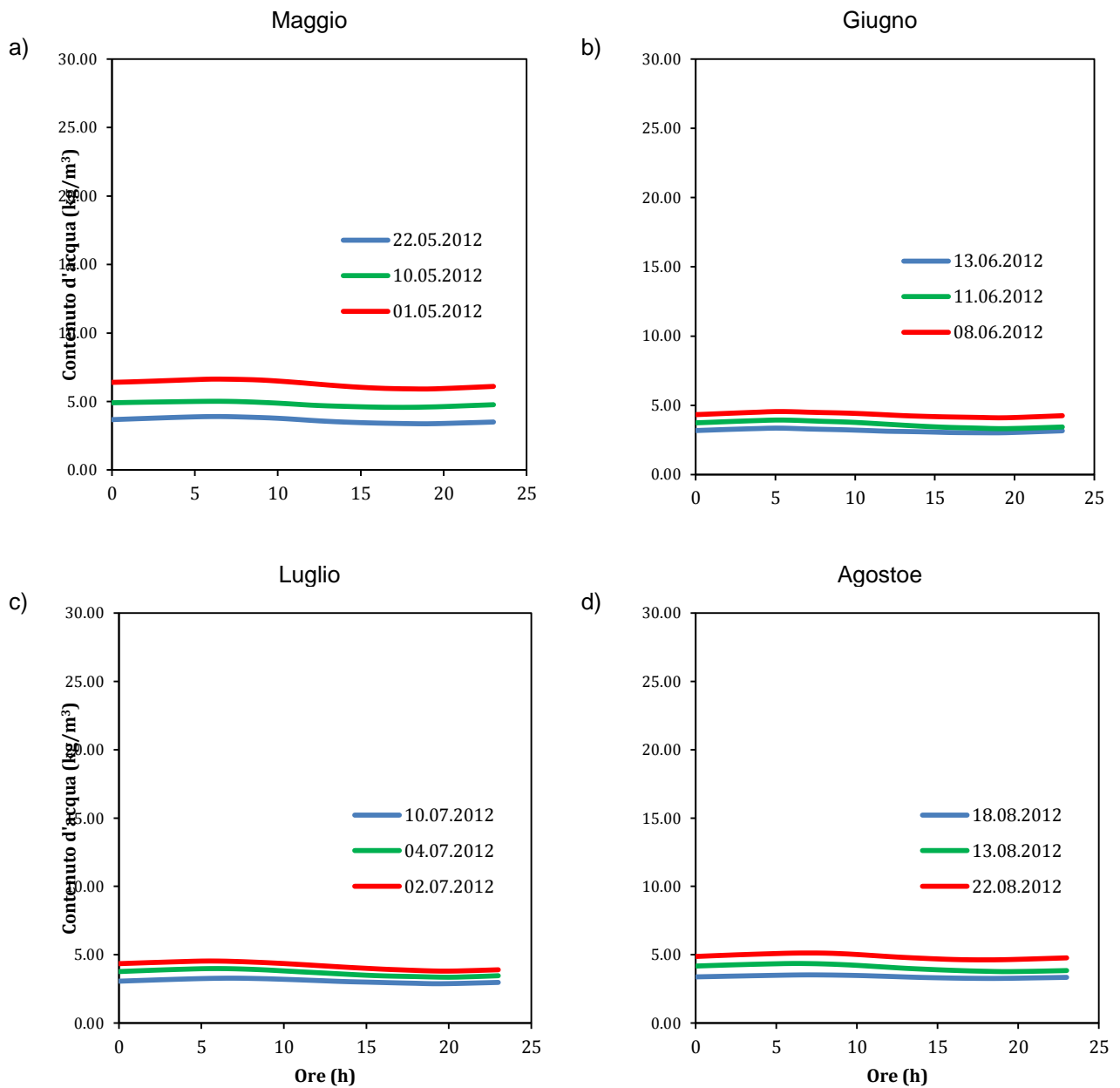


## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Milano\_Nord\_α=0,5\_Contenuto d'acqua nello strato isolante



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

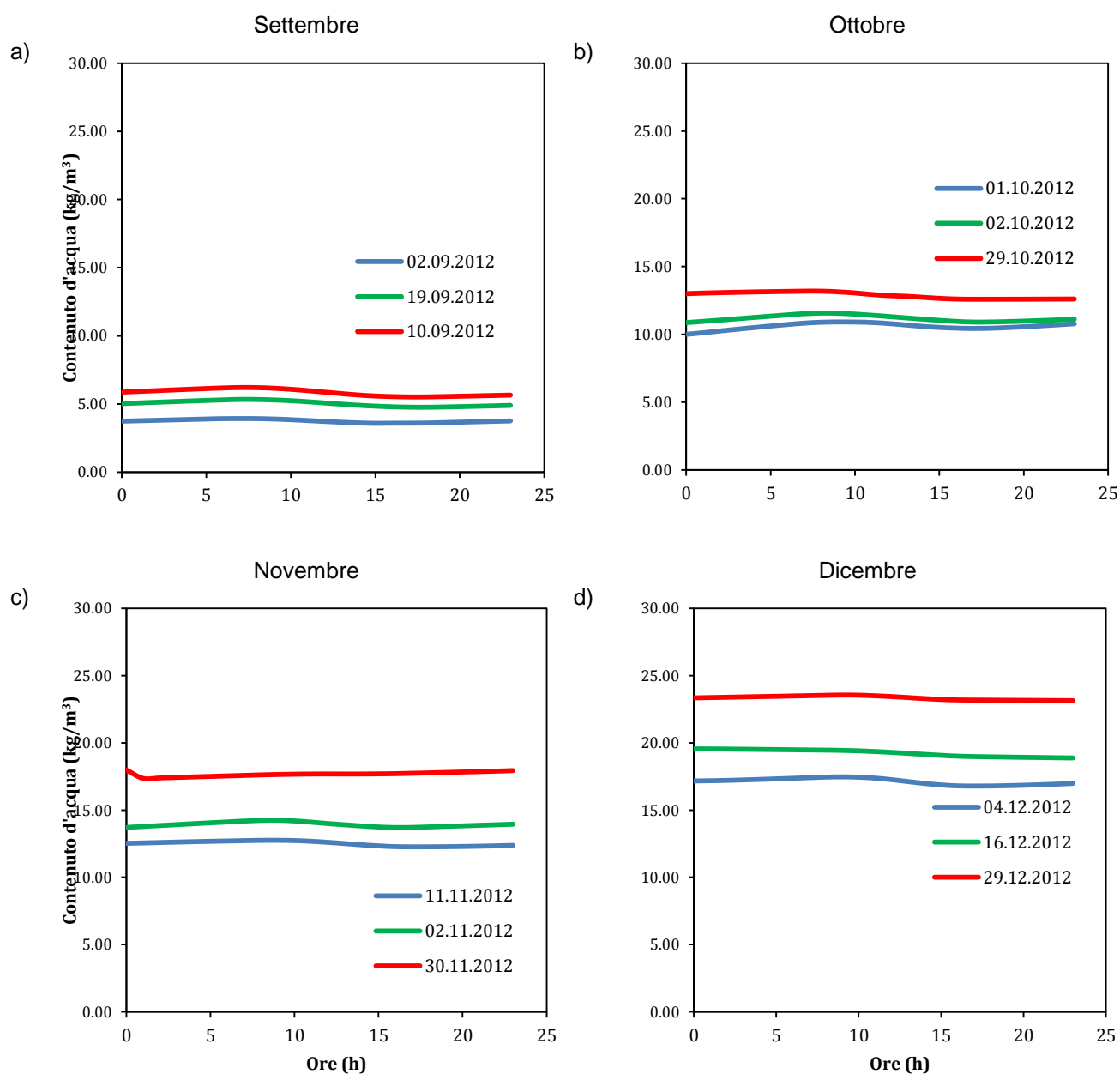


Figura 15 : Esempio di andamento del contenuto d'acqua esportato da WUFI

I grafici mostrano l'andamento del contenuto d'acqua nello strato isolante (lana minerale) per la città di Milano, esposizione Nord e coefficiente di assorbimento solare  $\alpha=0,5$ .

Le tre funzioni in ciascun grafico rappresentano i profili sulle 24 ore dei tre giorni in cui è stato rilevato il contenuto d'acqua massimo (rosso), minimo (blu) e medio (verde) nel mese di riferimento.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Per ogni città è quindi possibile riportare i fattori climatici esterni orari visti in precedenza per un arco di tempo di un anno, per un totale di 8760 ore.

Una volta disponibili tutti questi dati si può procedere con il calcolo della frequenza con cui si presentano determinati range di valori critici per valutare il comportamento degli ETICS soggetti alle diverse condizioni ambientali ai fini della durabilità.

## 5.1 Analisi preliminare

Per avere un quadro completo del clima che caratterizza il sud dell'Europa abbiamo proceduto all'individuazione di città che lo potessero rappresentare al meglio. Abbiamo preso in considerazione città costiere, in montagna, sul lago e in pianura.

Per un'analisi preliminare abbiamo selezionato 20 città:

- in Italia abbiamo scelto Bolzano, Modena, Napoli, Palermo, Roma e Trieste;
- in Spagna Barcellona, Bilbao, Madrid, Malaga e Palma di Mallorca;
- in Francia le città di Grenoble e Marsiglia;
- in Svizzera Locarno, Davos e Zurigo;
- la città di Lisbona per il Portogallo;
- Atene in Grecia;
- in Turchia Istanbul e Smirne.



Figura 16 : Città Sud Europa analizzate

Per rappresentare meglio le città in esame sono stati riassunti i principali dati a nostra disposizione (longitudine, latitudine, radiazione solare massima, livello di pioggia e zona climatica di appartenenza secondo la ISO 15686-7) nella Tabella 3

E' inoltre riportata la disponibilità dei dati di input (da programma WUFI e TRY – Test Reference Year); poichè per alcune città erano presenti entrambi i dati abbiamo proceduto ad un confronto tra le due fonti per avere un riscontro su quale fosse la più completa e la più attendibile.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 3 : Lista delle città e relativi dati; a.n.d. = anno non disponibile ma dato presente, n.d. = dati non disponibili perchè non presenti.

LOCALITA'	LONG.	LAT.	H livello del mare	DATI TRY	DATI WUFI	Pioggia	Rad. max	Zona climatica
			[m]	Anno	Anno	[mm/anno]	[kWh/m <sup>2</sup> a]	ISO 15686-7
<b>ITALIA</b>								
Bolzano	11°33' E	46°47' N	241 m	2005	2004	705	1445	B
Modena	10°92' E	44°65' N	41 m	a.n.d.	2004	720	1250	B
Napoli	14°15' E	40°49' N	17 m	1984-1997	a.n.d.	n.d.	1562	C
Palermo	13°21' E	38°06' N	14 m	1982-1998	a.n.d.	n.d.	1802	C
Roma	12°28' E	41°53' N	20 m	1982-1997	a.n.d.	n.d.	1586	C
Torino	7°68' E	45°00' N	267 m	1982-1998	2004	838	1407	B
Trieste	13°78' E	45°65' N	11 m	2005	2004	1046	1415	B
<b>FRANCIA</b>								
Grenoble	5°70' E	45°20' N	223 m	a.n.d.	a.n.d.	1222	1240	B
Marsiglia	5°22' E	43°17' N	12 m	1982-1996	a.n.d.	n.d.	1721	C
<b>SPAGNA</b>								
Barcellona	2°08' E	41°30' N	6 m	1989	2005	513	1837	C
Bilbao	2°91' O	43°30' N	39 m	1989	2007	1089	1332	C
Madrid	3°67' O	40°41' N	667 m	1989	2007	406	1895	C
Malaga	4°49' O	36°67' N	7 m	1989	2005	313	2012	C
Palma	2°74' E	39°56' N	4 m	1989	2005	312	1832	C
<b>PORTOGALLO</b>								
Lisbona	9°13' O	38°77' N	110 m	a.n.d.	a.n.d.	675	1878	C
<b>SVIZZERA</b>								
Locarno	8°78' E	46°17' N	366 m	a.n.d.	a.n.d.	1851	1392	B
Davos	9°82' E	46°82' N	1590 m	a.n.d.	a.n.d.	1079	1550	B
Zurigo	8°57' E	47°38' N	556 m	a.n.d.	a.n.d.	1008	1134	B
<b>GRECIA</b>								
Atene	23°43' E	37°58' N	70 m	1982-1999	a.n.d.	n.d.	1785	C
<b>TURCHIA</b>								
Istanbul	28°58' E	41°01' N	-	1982-1997	a.n.d.	n.d.	1457	C
Smirne	27°09' E	38°25' N	30 m	1982-1988	a.n.d.	n.d.	1818	C

L'ETICS utilizzato come modello per questa prima serie di simulazioni può essere così sintetizzato:

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

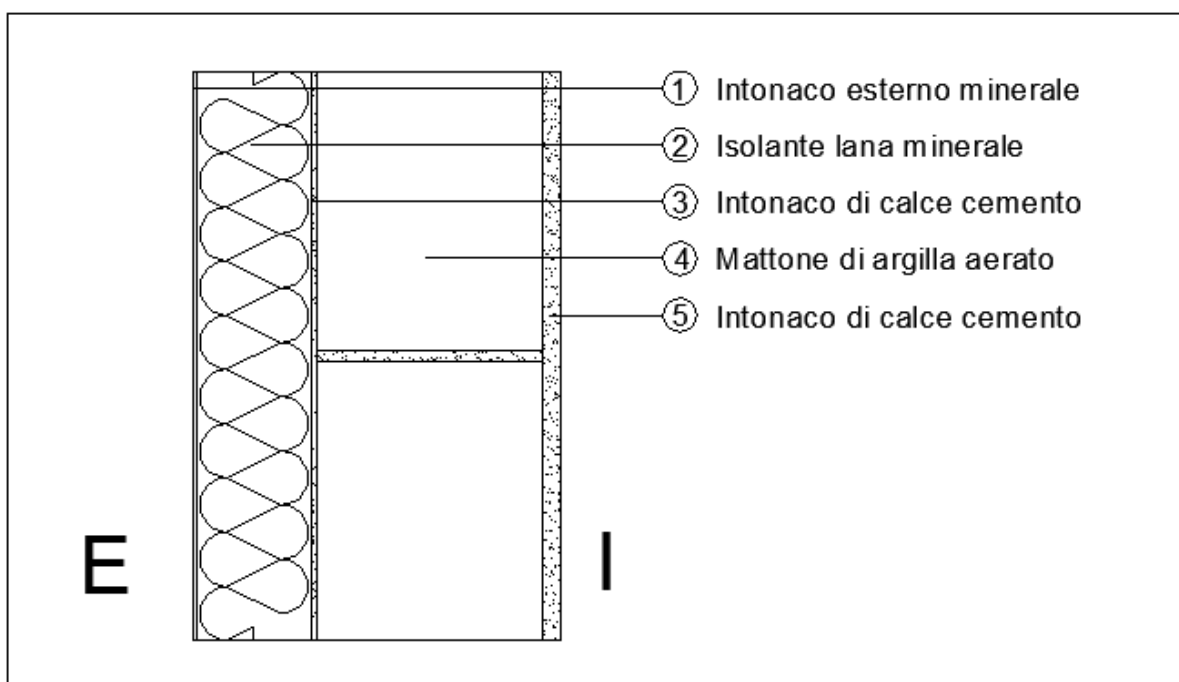


Tabella 4 : Proprietà materiali ETICS

ETICS					
		Sp.	$\lambda_{dry}(10^{\circ}C)$	$\mu$	Porosità
		[m]	[W/mK]	[-]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
Esterno					
1	Intonaco esterno minerale	0.004	0.8	25	0.24
2	MW	0.1	0.04	1.3	0.95
3	Intonaco minerale	0.005	0.8	25	0.24
4	Laterizio (600 kg/m3)	0.2	0.12	16	0.77
5	Intonaco calce cemento	0.015	0.8	19	0.24
Interno					

Di seguito riportiamo una schermata di esempio presa dal programma che riporta il clima esterno di una città (Barcellona) :

Temperatura media [°C]	16.3	Umidità relativa d'aria media [%]	67
Temperatura massima [°C]	34.3	Umidità relativa d'aria massima [%]	99
Temperatura minuti [°C]	-1.0	Umidità relativa d'aria minima [%]	13

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Somma irraggiamento	[kWh/m <sup>2</sup> a]	Somma pioggia verticale	513	[mm/a]
---------------------	------------------------	-------------------------	-----	--------

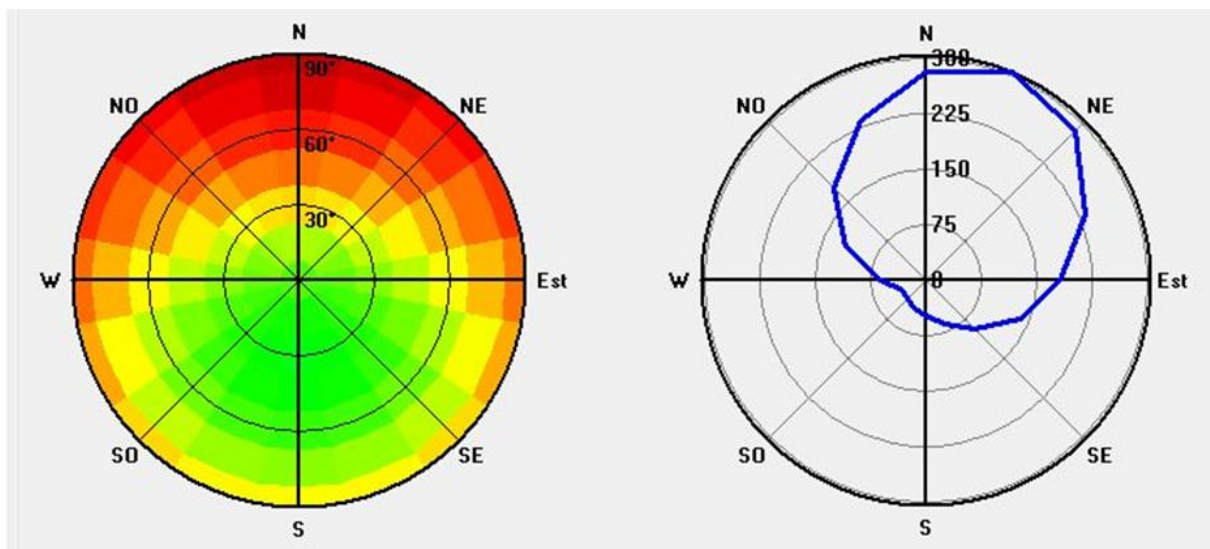


Figura 17 : Esempio di schermata di analisi di un clima con software WUFI

Come si può notare dalla Tabella 3 i dati climatici a nostra disposizione provengono da fonti diverse. Per alcune città sono presenti sia dati da software WUFI che Test Reference Year, mentre per altre solo questi ultimi, perché assenti nel database di WUFI. I risultati ottenuti cambiano in funzione della fonte utilizzata. Questo è dovuto al fatto che i dati climatici di WUFI si riferiscono ad anni singoli e in alcuni casi il riferimento è assente.

I TRY sono valutati su archi temporali maggiori per alcune città (Palermo ha un data set di 17 anni), per altre su un solo anno (ad esempio Barcellona o Madrid) . Inoltre sono sprovvisti dei dati relativi alla pioggia.

Per questo motivo è stato condotto, per ogni città che disponesse di entrambi i dati, un confronto degli scostamenti per determinare l'affidabilità delle simulazioni effettuate.

Per valutare a quali condizioni climatiche critiche può essere soggetto il sistema a cappotto, sono stati fissati dei limiti e contata la frequenza oraria e giornaliera con cui questi vengono superati nell'arco di un intero anno.

I limiti sono:

- Test  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ,  $31^{\circ}\text{C}$ ,  $32^{\circ}\text{C}$ ,  $33^{\circ}\text{C}$ ,  $34^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$ ;
- Test  $< 0^{\circ}\text{C}$ ,  $-1^{\circ}\text{C}$ ,  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-3^{\circ}\text{C}$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ ;
- U.R. est  $\geq 80\%$ ,  $90\%$
- U.R. oraria e sulle 12 ore  $> 20$ ,  $25$ ,  $30\%$ ;



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

- U.R. > 90% senza pioggia.

I limiti per prendere in esame gli shock termici sulla superficie esterna del cappotto sono:

- $\Delta T_{sup}$  orario > 4°C, 5°C, 6°C, 7°C, 8°C, 9°C, 10 ° C;
- $\Delta T_{sup}$  giornaliero > 4°C, 5°C, 6 °C;
- $\Delta T_{sup}$  orario > 6° C e pioggia.

Le analisi delle temperature superficiali vengono condotte per gli orientamenti Nord e Sud.

Le condizioni “al contorno”, che il programma WUFI fa esplicitare nella sezione coefficiente di trasmissione superficiale, impostate WUFI sono:

- Esterne: resistenza al passaggio di calore pari a 0.0588 m<sup>2</sup>K/W correlata al vento reale; coefficiente di assorbimento a onde corte di 0.5 e coefficiente a onde lunghe di 0.9; coefficiente di assorbimento della pioggia pari a 0.7 preimpostato in base al tipo di elemento costruttivo e alla sua inclinazione;
- Interna: resistenza al passaggio di calore pari a 0.125 m<sup>2</sup>K/W .

Le condizioni iniziali per le simulazioni invece sono:

- Temperatura iniziale nell'elemento costruttivo costante in tutto l'elemento con valore pari a 20°C;
- Umidità di cantiere impostata per ogni singolo strato

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Vengono di seguito riportate le tabelle riassuntive dell'analisi svolta:

Tabella 5 : Dati Temperature Italia e Spagna

T <sub>est</sub> h/anno Limiti	Nazioni																	
	Italia								Spagna									
	Bolzano		Modena	Napoli	Palermo	Roma	Trieste		Barcellona		Bilbao		Madrid		Malaga		Palma	
	TRY	WUFI	WUFI	TRY	TRY	TRY	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI
T <sub>est</sub> ≥ 30°C	127	159	308	241	49	67	138	40	37	54	9	49	252	230	240	353	125	370
T <sub>est</sub> ≥ 31°C	80	94	200	126	14	13	72	18	23	11	0	29	202	167	184	249	75	204
T <sub>est</sub> ≥ 32°C	41	58	105	55	7	0	16	5	8	4	0	18	132	112	88	179	33	93
T <sub>est</sub> ≥ 33°C	11	31	41	17	2	0	0	0	0	4	0	9	75	81	31	124	7	49
T <sub>est</sub> ≥ 34°C	3	17	14	6	0	0	0	0	0	3	0	5	36	42	6	87	0	22
T <sub>est</sub> ≥ 35°C	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	12	20	0	51	0	13
T <sub>est</sub> < 0°C	1165	781	30	11	0	33	156	0	0	11	0	45	1	22	0	0	0	73
T <sub>est</sub> < -1°C	961	525	12	3	0	21	89	0	0	0	0	12	0	3	0	0	0	32
T <sub>est</sub> < -2°C	778	319	4	1	0	11	44	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	4
T <sub>est</sub> < -3°C	591	185	1	1	0	3	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
T <sub>est</sub> < -4°C	440	86	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T <sub>est</sub> < -5°C	321	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Il confronto tra i dati WUFI delle città italiane e quelle spagnole mette in evidenza la grande differenza di temperatura tra i due stati.

Le città spagnole risultano molto calde, superando abbondantemente i 30°C anche per più di 200 ore/anno, fatta eccezione per Barcellona che risulta più mitigata. Caratteristica comune a tutte le città spagnole è che le temperatura non scende o lo fa per pochissime ore sotto 0°C

Modena sorprendentemente è soggetta a estati calde anche se le temperature non superano mai i 35°C in un anno.

Bolzano si conferma la città più fredda tra quelle presenti, infatti le temperature scendono sotto gli 0°C per circa due mesi all'anno.

Il confronto tra i dati TRY non rende bene l'idea del clima caratteristico di una città, perché questi prendono in considerazione una media delle temperature, escludendo i massimi e i minimi. Per questo motivo può sembrare che una città come Palermo o Roma abbia temperature più simili a quelle di Trieste con dati WUFI.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 6 : Dati Umidità Relativa Italia e Spagna

h/anno Limiti	Bolzano		Modena	Napoli	Palermo	Roma	Trieste		Barcellona		Bilbao		Madrid		Malaga		Palma	
	TRY	WUFI	WUFI	TRY	TRY	TRY	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI
U.R. ≥ 80%	4490	2453	2169	2354	3184	4673	2427	2765	2511	1601	0	3854	945	2002	1679	2059	1794	5277
U.R. ≥ 90%	3148	1161	647	562	725	2374	922	1311	849	143	0	615	235	869	511	446	408	3802
$\Delta U.R.$ -oraria > 20%	67	87	5	43	25	17	5	36	2	9	3	83	6	22	2	16	3	73
$\Delta U.R.$ -oraria > 25%	22	34	2	17	12	9	3	13	1	5	2	29	2	11	0	4	2	32
$\Delta U.R.$ -oraria > 30%	10	15	2	7	8	7	2	4	1	4	1	15	1	4	0	1	1	9
$\Delta U.R.$ -12 ore > 20%	595	505	180	562	220	493	245	151	412	395	420	490	475	412	443	3	287	628
$\Delta U.R.$ -12 ore > 25%	529	403	74	436	143	383	147	68	250	235	246	388	292	253	240	4	117	551
$\Delta U.R.$ -12 ore > 30%	464	266	34	332	93	269	64	30	114	109	126	257	130	144	87	3	27	437
U.R. + pioggia																		
Giorni di U.R. > 90% senza pioggia	/	712	463	/	/	/	/	396	/	92	/	276	/	658	/	58	/	1771

In questa tabella vengono rappresentati i “salti” di Umidità relativa sempre per le città spagnole e italiane.

Il dato più interessante è quello sintetizzato nell'ultima riga, l'unica limitazione è data dall'impossibilità di averlo per tutte le città perchè i dati TRY sono sprovvisti di pioggia.

Indica quante ore all'anno sono caratterizzate da un umidità relativa superiore al 90% senza che l'influenza della pioggia. Si può notare che a Barcellona e a Madrid, pur essendoci parecchie ore di differenza in cui si supera il 90% (1/3 in più a Madrid), la piovosità è scarsa mentre a Malaga è alta.

Le città con il più alto numero di ore con  $\Delta U.R.$  oraria superiore al 20% sono Bolzano e Bilbao.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 7 : Dati Temperature Città Sud Europa

T <sub>est</sub> h/anno Limiti	Nazioni								
	Francia		Grecia	Portogallo	Svizzera			Turchia	
	Grenoble	Marsiglia	Atene	Lisbona	Davos	Locarno	Zurigo	Istanbul	Smirne
	WUFI	TRY	TRY	WUFI	WUFI	WUFI	WUFI	TRY	TRY
T <sub>est</sub> ≥ 30°C	197	161	488	146	0	37	4	629	625
T <sub>est</sub> ≥ 31°C	136	71	339	103	0	13	0	9	459
T <sub>est</sub> ≥ 32°C	97	27	228	66	0	0	0	0	317
T <sub>est</sub> ≥ 33°C	65	10	137	41	0	0	0	0	221
T <sub>est</sub> ≥ 34°C	36	2	79	18	0	0	0	0	127
T <sub>est</sub> ≥ 35°C	18	0	42	6	0	0	0	0	65
T <sub>est</sub> < 0°C	328	105	0	0	2670	706	1406	143	31
T <sub>est</sub> < -1°C	273	51	0	0	2332	505	1027	105	12
T <sub>est</sub> < -2°C	235	13	0	0	1976	327	713	69	6
T <sub>est</sub> < -3°C	183	3	0	0	1677	176	453	34	1
T <sub>est</sub> < -4°C	116	2	0	0	1402	86	325	13	0
T <sub>est</sub> < -5°C	63	0	0	0	1140	27	252	9	0

Le città più calde sono sicuramente Atene, Smirne e Istanbul, anche se quest'ultima raggiunge frequentemente temperature molto basse.

Le città più fredde, ovviamente, sono le tre città svizzere, Davos Locarno e Zurigo, con Locarno che arriva ad avere in estate qualche ora sopra i 30°C.

Lisbona presenta un clima abbastanza mite in cui non si hanno molte ore all'anno superiori ai 30°C e al tempo stesso la temperatura non scende sotto lo zero.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 8 : Dati Umidità Clttà Sud Europa

h/anno Limiti	Nazioni								
	Grenoble	Marsiglia	Atene	Lisbona	Davos	Locarno	Zurigo	Istanbul	Smirne
	WUFI	TRY	TRY	WUFI	WUFI	WUFI	WUFI	TRY	TRY
U.R. $\geq$ 80%	6099	5752	1160	3979	4611	4025	5069	3245	2119
U.R. $\geq$ 90%	4915	1085	178	1294	2490	2184	2772	971	485
$\Delta$ U.R. <sub>oraria</sub> > 20%	23	23	54	7	16	15	1	65	61
$\Delta$ U.R. <sub>oraria</sub> > 25%	10	8	22	2	1	4	0	30	29
$\Delta$ U.R. <sub>oraria</sub> > 30%	5	2	8	1	0	2	0	14	7
$\Delta$ U.R. <sub>12 ore</sub> > 20%	478	465	438	283	477	537	356	432	564
$\Delta$ U.R. <sub>12 ore</sub> > 25%	397	340	285	161	415	459	254	310	453
$\Delta$ U.R. <sub>12 ore</sub> > 30%	305	223	151	77	337	354	152	200	331
U.R. + pioggia									
Giorni di U.R. > 90% senza pioggia	2049	/	/	866	1945	1466	2052	/	/

Stesso discorso affrontato in precedenza si può notare che per Lisbona, Locarno e Zurigo la pioggia non è la componente principale dell'innalzamento dell'umidità relativa sopra al 90%.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Passiamo ora ad affrontare nel particolare gli shock termici per gli orientamenti Nord e Sud.

Tabella 9 : Dati Temperature Superficiali Italia Spagna – Nord

h/anno Limiti	Italia								Nazioni									
	Bolzano		Modena	Napoli	Palermo	Roma	Trieste		Barcellona		Bilbao		Madrid		Malaga		Palma	
	TRY	WUFI	WUFI	TRY	TRY	TRY	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 4^{\circ}\text{C}$	205	167	102	135	48	116	16	90	288	196	226	174	389	269	353	311	42	338
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 5^{\circ}\text{C}$	50	54	26	25	14	17	3	24	142	49	109	77	208	150	140	142	25	135
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 6^{\circ}\text{C}$	13	15	3	4	4	3	0	12	57	14	33	29	81	73	51	58	10	53
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 7^{\circ}\text{C}$	4	4	1	1	1	1	0	4	18	1	4	13	28	18	8	24	1	13
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 8^{\circ}\text{C}$	2	2	0	0	1	0	0	4	1	1	0	6	2	2	0	8	0	5
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 9^{\circ}\text{C}$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	6	0	2	0	4	0	0
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 10^{\circ}\text{C}$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	6	0	1	0	2	0	0
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 4^{\circ}\text{C}$	696	677	610	716	704	710	614	585	719	710	690	672	699	697	722	723	718	718
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 5^{\circ}\text{C}$	675	636	559	704	665	698	547	525	698	692	641	622	650	685	698	713	682	708
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 6^{\circ}\text{C}$	645	612	516	687	579	676	490	446	647	670	589	582	593	662	654	689	615	698
$\Delta t_{sup \text{ h}} > 6^{\circ}\text{C} \& \text{ Rain}$	/	14	3	/	/	/	/	11	/	14	/	29	/	71	/	58	/	53

Tabella 10 : Dati Temperature Superficiali Italia Spagna – Sud

h/anno Limiti	Italia								Nazioni									
	Bolzano		Modena	Napoli	Palermo	Roma	Trieste		Barcellona		Bilbao		Madrid		Malaga		Palma	
	TRY	WUFI	WUFI	TRY	TRY	TRY	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI	TRY	WUFI
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 4^{\circ}\text{C}$	1129	1369	1085	1086	1099	1088	669	1152	1539	1208	1003	1165	1502	1888	1654	1390	1504	1491
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 5^{\circ}\text{C}$	633	1015	664	711	597	722	330	760	1063	878	637	811	1060	1425	1190	970	942	1020
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 6^{\circ}\text{C}$	342	715	436	447	326	477	135	502	738	681	390	545	721	1039	810	659	581	713
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 7^{\circ}\text{C}$	168	494	283	279	168	317	52	337	513	518	245	351	470	723	571	457	373	499
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 8^{\circ}\text{C}$	67	351	177	169	83	200	14	232	345	384	145	231	335	496	387	319	241	361
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 9^{\circ}\text{C}$	18	242	113	94	33	121	3	160	199	282	80	150	212	339	183	223	147	267
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 10^{\circ}\text{C}$	3	164	72	34	18	62	0	103	84	213	38	90	78	215	97	161	93	188
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 4^{\circ}\text{C}$	708	690	631	721	719	709	660	634	728	716	710	683	723	698	729	1390	729	722
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 5^{\circ}\text{C}$	693	668	617	712	709	697	625	611	722	702	686	649	715	687	725	970	727	720
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 6^{\circ}\text{C}$	677	652	598	698	702	678	602	591	709	685	653	619	705	681	721	659	717	715
$\Delta t_{sup \text{ h}} > 6^{\circ}\text{C} \& \text{ Rain}$		712	436	/	/	/	/	501	/	681	/	544	/	1033	/	657	/	712

Nella Tabella 9, si può notare che le frequenze di superamento dei limiti sono superiori in Spagna rispetto all'Italia e per entrambi non si registrano accadimenti significativi per i  $\Delta T_{\text{orari}}$  più alti. I valori dei  $\Delta T_{\text{giornalieri}}$  sono simili e abbastanza elevati per entrambe le nazioni in quanto è più facile che le temperature superficiali varino di 4,5,6°C nell'arco delle 12 ore.

### 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Come visto in precedenza si può fare un discorso analogo per la pioggia che però in questo caso è la principale responsabile delle variazioni orarie di temperatura e quindi è da considerarsi uno dei fattori principali che possono causare shock termici.

Nella Tabella 10 i valori sono ovviamente molto più alti rispetto all'esposizione Nord. Sia le città italiane che quelle spagnole presentano valori simili per quando riguarda il superamento del  $\Delta T$  orario di 4°C, nell'ordine delle 1000 ore.

Se le città italiane diminuiscono sensibilmente la frequenza man mano che aumenta il  $\Delta T$  orario, quelle spagnole invece presentano ancora valori alti, il che significa forte stress per i rivestimenti.

I valori del  $\Delta T$  giornaliero invece sono in linea tra loro, anche man mano che aumentando il salto termico.

Tabella 11 : Dati Temperature Superficiali Città Sud Europa – Nord

h/anno Limiti	Nazioni								
	Francia		Grecia	Portogallo	Svizzera			Turchia	
	Grenoble	Marsiglia	Atene	Lisbona	Davos	Locarno	Zurigo	Istanbul	Smirne
	WUFI	TRY	TRY	WUFI	WUFI	WUFI	WUFI	TRY	TRY
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 4^{\circ}\text{C}$	256	133	109	130	254	555	198	51	246
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 5^{\circ}\text{C}$	90	29	14	40	72	219	66	9	62
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 6^{\circ}\text{C}$	33	4	1	8	16	63	23	3	13
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 7^{\circ}\text{C}$	11	2	1	2	4	13	2	1	3
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 8^{\circ}\text{C}$	3	1	1	0	0	3	0	1	0
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 9^{\circ}\text{C}$	2	1	1	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 10^{\circ}\text{C}$	0	1	1	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 4^{\circ}\text{C}$	643	701	716	669	680	673	571	669	721
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 5^{\circ}\text{C}$	607	672	695	614	650	656	526	633	706
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 6^{\circ}\text{C}$	571	630	667	553	613	641	475	586	687
$\Delta t_{sup \text{ h}} > 6^{\circ}\text{C} \& \text{ Rain}$	32	/	/	8	15	60	21	/	/

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

E' interessante notare che anche nella Tabella 11 i  $\Delta T$  sulle 12 ore sono simili per tutte le città; Locarno presenta un'elevato numero di ore che superano il limite orario  $> 4^{\circ}\text{C}$  al contrario di Istanbul che ha il valore più basso tra tutte le città europee considerate.

Stesso discorso detto in precedenza per le città italiane e spagnole si può fare sulla pioggia anche per queste città.

Tabella 12 : Dati Temperature Superficiali Città Sud Europa – Sud

h/anno Limiti	Nazioni								
	Francia		Grecia	Portogallo	Svizzera			Turchia	
	Grenoble	Marsiglia	Atene	Lisbona	Davos	Locarno	Zurigo	Istanbul	Smirne
	WUFI	TRY	TRY	WUFI	WUFI	WUFI	WUFI	TRY	TRY
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 4^{\circ}\text{C}$	1274	1502	1260	1415	1444	1457	852	660	1497
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 5^{\circ}\text{C}$	927	1046	811	942	1001	953	469	342	942
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 6^{\circ}\text{C}$	650	663	476	593	672	538	213	197	609
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 7^{\circ}\text{C}$	393	433	290	348	454	294	75	107	377
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 8^{\circ}\text{C}$	242	249	175	209	311	165	23	48	221
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 9^{\circ}\text{C}$	163	118	109	132	218	87	8	18	117
$\Delta t_{\text{sup orario}} > 10^{\circ}\text{C}$	109	48	68	78	149	35	0	7	67
$\Delta t_{\text{sup 12 ore}} > 4^{\circ}\text{C}$	649	717	724	705	708	680	591	709	710
$\Delta t_{\text{sup 12 ore}} > 5^{\circ}\text{C}$	621	706	716	688	694	662	559	688	702
$\Delta t_{\text{sup 12 ore}} > 6^{\circ}\text{C}$	592	696	700	674	678	653	527	656	687
$\Delta t_{\text{sup h}} > 6^{\circ}\text{C} \& \text{ Rain}$	644	/	/	592	670	535	209	/	/

Anche per l'esposizione Sud le città presentano valori abbastanza simili tra loro per quanto riguarda i valori giornalieri.

Allo stesso modo si può affermare che le città che si affacciano sul mare hanno valori simili tra loro; l'unica città che si discosta dalle altre per valori sensibilmente più bassi è Istanbul che ha valori di differenze di temperature orari 1/3 più bassi rispetto a Smirne, Lisbona e Marsiglia.

Grenoble e Davos presentano valori orari ancora alti per  $\Delta T >$  di 9 e  $10^{\circ}\text{C}$ .



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Di seguito riportiamo, a titolo esemplificativo, i risultati prodotti sotto forma di grafico della città di Madrid.

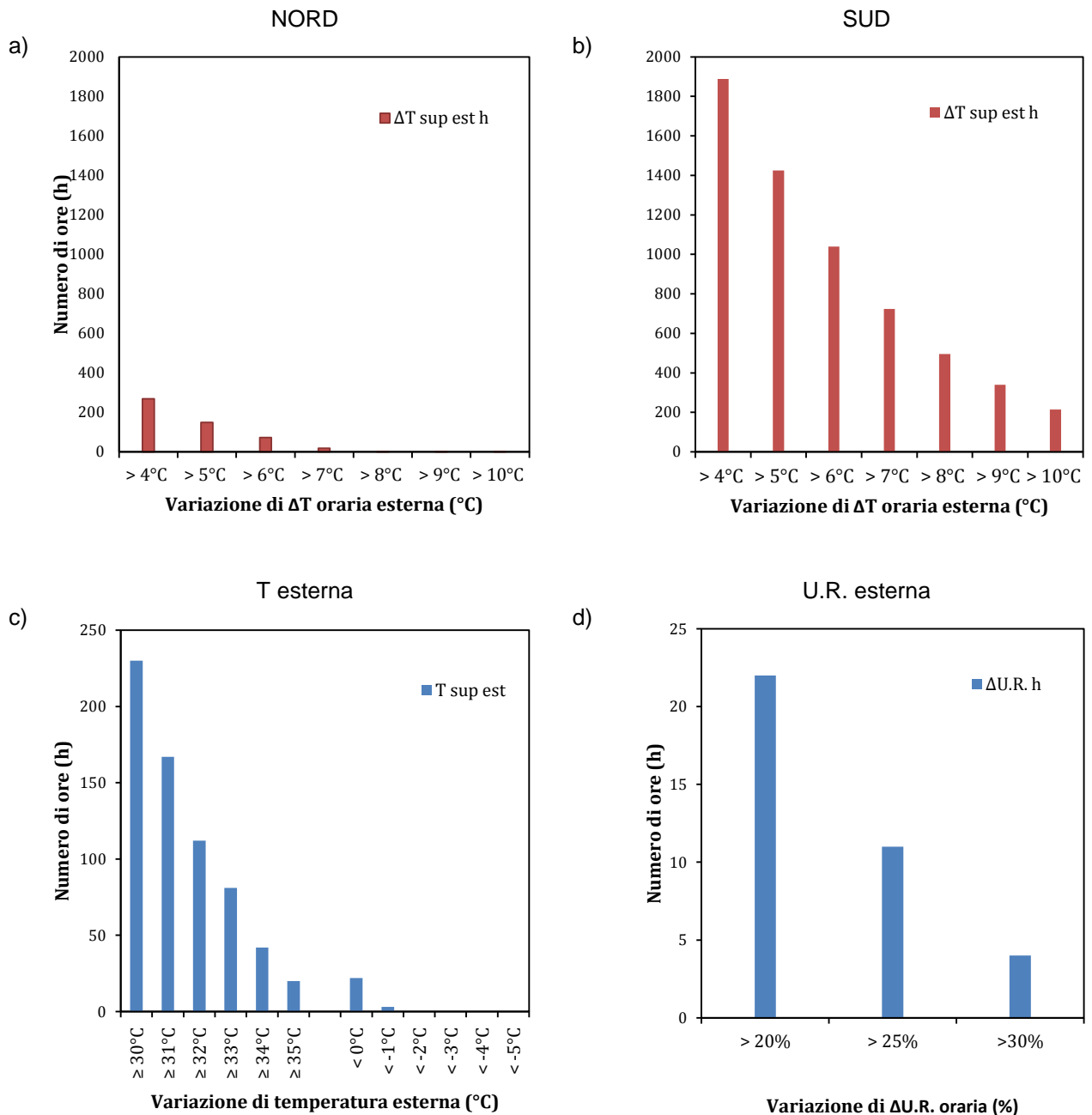


Figura 18 : I grafici 3.a e 3.b indicano le frequenze di temperature superficiali orarie per gli orientamenti Nord e Sud, il grafico 3.c riporta i valori di temperatura esterna oraria, il grafico 3.d riporta i valori di umidità relativa esterna oraria.

I diagrammi a barre ci danno una visione più immediata delle frequenze precedentemente inserite nelle tabelle delle temperature superficiali. Particolarmente chiara è la differenza tra gli orientamenti Nord e Sud.

## **5.2 Seconda analisi : cicli estate/inverno**

### *5.2.1 Analisi climatica*

In questa seconda fase vengono riprese le analisi precedentemente eseguite e verrà fatto un approfondimento ulteriore per quel che riguarda le condizioni climatiche. Sono stati analizzati gli shock termici per le stagioni estive e invernali e aggiunte altre limiti prestazionali all'analisi.

Sono stati utilizzati inoltre nuovi dati climatici, più completi rispetto ai precedenti, ricavati dall'archivio METEONORM.

Si è deciso di operare una selezione rispetto alle città di partenza per facilitare la scelta di pochi climi che possano però rappresentare l'intero panorama sud europeo, e anche perchè un'analisi simile su tutte i siti esaminati sarebbe stata molto dispersiva. E' stato inoltre fatto un confronto tra le città che avevano sia i dati di WUFI che i dati Meteonorm.

La selezione ha ristretto il campo a 10 città :

- Francia : Marsiglia;
- Italia : Milano, Palermo, Roma;
- Portogallo : Lisbona;
- Spagna : Barcellona, Madrid, Santander;
- Svizzera : Locarno;
- Turchia : Istanbul.



Figura 19 : Città Sud Europa analizzate

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Rispetto alla precedente sono state eliminate 12 città e aggiunte Milano, per avere una città rappresentativa del Nord Italia e quindi avere una mappatura completa del territorio italiano, e Santander, sia perchè i dati di Bilbao non erano presenti nel nuovo archivio e sia perchè la città di Santander può significativamente rappresentare, essendo distante meno di 100km da Bilbao e avendo la stessa latitudine, il clima spagnolo sul versante dell'oceano Atlantico.

Come nella precedente analisi si riporta una tabella con tutti i dati climatici WUFI, TRY integrati con i nuovi dati METEONORM.

Tabella 13 : Lista delle città e relativi dati; a.n.d. = anno non disponibile ma dato presente, n.d. = dati non disponibili perchè non presenti.

LOCALITA'	LONG.	LAT.	H livello del mare	DATI M.NORM	DATI TRY	DATI WUFI	Pioggia	Rad.max	Zona climatica
			[m]	Anno	Anno	Anno	[mm/anno]	[kWh/m <sup>2</sup> a]	ISO 15686-7
<b>ITALIA</b>									
Milano	9° 20' E	45° 47' N	98	a.n.d.	/	/	950	1343	B
Palermo	13°21' E	38°06' N	14 m	a.n.d.	1982-1998	a.n.d.	599	1802	C
Roma	12°28' E	41°53' N	20 m	a.n.d.	1982-1997	a.n.d.	825	1586	C
<b>FRANCIA</b>									
Marsiglia	5°22' E	43°17' N	12 m	a.n.d.	1982-1996	a.n.d.	558	1721	C
<b>SPAGNA</b>									
Barcellona	2°08' E	41°30' N	6 m	a.n.d.	1989	2005	513	1837	C
Madrid	3°67' O	40°41' N	667 m	a.n.d.	1989	2007	406	1895	C
Santander	3°48' O	43°27' N	70 m	a.n.d.	/	/	1270	1334	C
<b>PORTOGALLO</b>									
Lisbona	9°13' O	38°77' N	110 m	/	a.n.d.	/	675	1878	C
<b>SVIZZERA</b>									
Locarno	8°78' E	46°17' N	366 m	/	a.n.d.	/	1851	1392	B

Non essendo ancora in possesso, durante questa seconda fase, di tutti i dati necessari per la definizione del pacchetto ETICS definitivo abbiamo considerato ancora la stratigrafia definita in precedenza (Tabella 4).

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

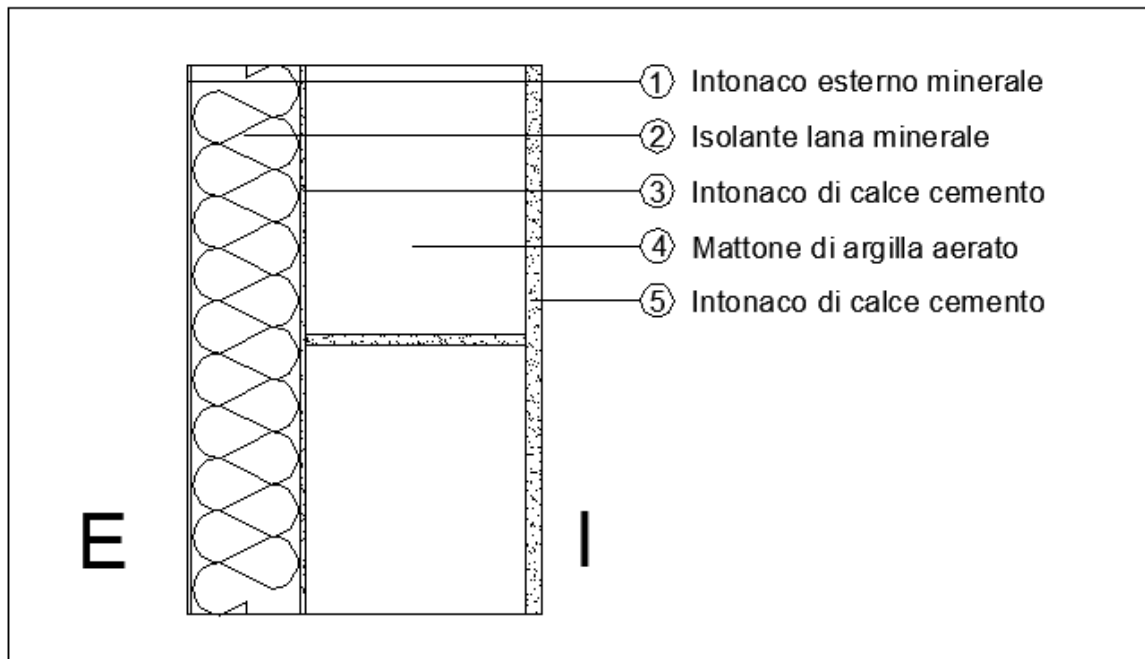


Tabella 14 : Proprietà materiali ETICS

ETICS					
		Sp.	$\lambda_{dry}(10^{\circ}C)$	$\mu$	Porosità
		[m]	[W/mK]	[-]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
Esterno					
1	Intonaco esterno minerale	0.004	0.8	25	0.24
2	MW	0.1	0.04	1.3	0.95
3	Intonaco minerale	0.005	0.8	25	0.24
4	Laterizio (600 kg/m <sup>3</sup> )	0.2	0.12	16	0.77
5	Intonaco calce cemento	0.015	0.8	19	0.24
Interno					

Si riportano solo i dati dei materiali come rimando all'ETICS utilizzato.

Per i nuovi dati climatici METEONORM non conosciamo gli anni di riferimento perchè sono differenti da stazione a stazione di rilevamento, sappiamo però che sono dati orari ricavati da medie mensili su un periodo di 10 anni e successivamente modellati. Possiamo affermare che sono i dati più affidabili utilizzati nelle prime due analisi perchè si basano su più anni (come i dati TRY) e sono integrati con i valori di pioggia e vento (come i dati WUFI).

I criteri di analisi su cui si basa questa seconda parte sono gli stessi esplicitati in precedenza; in aggiunta è stata posta attenzione alle stagioni estive e invernali. Infatti per le esposizioni Nord e Sud di ogni città i dati sono stati divisi nelle due stagioni raggruppandoli in inverno da ottobre a marzo e in

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

estate da aprile a settembre. Sono periodi più lunghi rispetto alle stagioni regolari ma ci danno comunque un'idea di quello che succede nei periodi caldi e freddi dell'anno. Inoltre sono state ampliate le analisi sulle differenze di temperatura superficiali nelle 12 ore aumentando il range a 7, 8, 9, 10 e 15 °C.

Tabella 15 : Dati temperature M.NORM

Test	Nazioni											
	Italia			Spagna					Francia	Portogallo	Svizzera	Turchia
	Milano	Palermo	Roma	Barcellona		Santander	Madrid		Marsiglia	Lisbona	Locarno	Istanbul
h/anno	M.NORM	M.NORM	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	WUFI	WUFI	M.NORM
≥ 30°C	46	49	183	43	54	0	317	230	147	146	37	40
≥ 31°C	19	14	95	18	11	0	217	167	70	103	13	18
≥ 32°C	0	7	47	4	4	0	141	112	38	66	0	6
≥ 33°C	0	2	18	0	4	0	95	81	14	41	0	0
≥ 34°C	0	0	9	0	3	0	55	42	0	18	0	0
≥ 35°C	0	0	0	0	0	0	16	20	0	6	0	0
< 0°C	603	0	7	0	11	0	91	22	53	0	706	146
< -1°C	383	0	0	0	0	0	47	3	18	0	505	68
< -2°C	227	0	0	0	0	0	12	0	0	0	327	33
< -3°C	131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	176	5
< -4°C	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	0
< -5°C	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0

In questa tabella sono riportate le condizioni climatiche della temperatura dell'aria esterna per ogni città. Si può vedere ad esempio come Palermo e Lisbona pur essendo quasi alla stessa latitudine presentano climi diversi nella stagione estiva (Lisbona è più "calda" rispetto a Palermo).

Per quanto riguarda la stagione invernale quasi tutte le città non risentono temperature che scendono sotto gli 0°C, solo Milano e Locarno arrivano ad avere temperature di -5°C o più basse (anche dato dal fatto che sono situati a circa 100 km di distanza). L'altra città che ha temperature che scendono sotto zero è Istanbul anche se non in maniera significativa.

Sempre riguardando le temperature superiori a 30°C si nota che Milano, Palermo, Barcellona e Istanbul hanno andamenti simili.

Molto particolare è Santander, che ha un clima mitigato dalla presenza dell'oceano, che non raggiunge gli zero gradi in inverno e i 30°C in estate.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 16 : Dati umidità relativa

		Nazioni											
		Italia			Spagna				Francia	Portogallo	Svizzera	Turchia	
h/anno	Limiti	Milano	Palermo	Roma	Barcellona		Santander	Madrid		Marsiglia	Lisbona	Locarno	Istanbul
		M.NORM	M.NORM	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	WUFI	WUFI	M.NORM
	U.R. ≥ 80%	4987	3184	3663	1569	1601	4064	2765	2002	2626	3979	4025	2960
	≥ 90	2566	725	1586	256	143	1980	924	869	700	1294	2184	1103
	$\Delta H.R._h > 20$	3	25	5	9	9	3	14	22	9	7	15	7
	> 25	0	12	1	1	5	1	2	11	1	2	4	2
	> 30	0	8	1	1	4	1	1	4	1	1	2	1
	$\Delta H.R._{12h} > 20$	481	220	641	487	395	375	621	412	585	283	537	504
	> 25	383	143	552	309	235	227	498	253	462	161	459	363
	> 30	274	93	420	159	109	116	360	144	296	77	354	233
	H H.R. > 90 no rain	2166	559	1299	190	92	1560	747	658	551	866	1466	888

Nella tabella che riporta l'umidità relativa le considerazioni che possono essere fatte sono analoghe a quella precedente (Tabella 15), soprattutto riguardando la riga che mostra il numero di ore di umidità relativa superiore al 90% senza che ci sia la pioggia.

La città più umida è Milano mentre la meno umida è Barcellona.

Madrid è simile a Istanbul nel confronto tra U.R. esterne.

Prendendo come esempio il confronto fatto in precedenza Palermo risulta essere meno umida rispetto a Lisbona.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 17 : Dati temperature esposizione Nord per il periodo di 1 anno

		Nazioni											
		Italia			Spagna			Francia	Portogallo	Svizzera	Turchia		
h/anno		Milano	Palermo	Roma	Barcellona		Santander	Madrid		Marsiglia	Lisbona	Locarno	Istanbul
	Limiti	M.NORM	M.NORM	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	WUFI	WUFI	M.NORM
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 4^{\circ}\text{C}$		146	70	160	288	196	92	178	269	133	130	555	51
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 5^{\circ}\text{C}$		57	20	52	142	49	38	89	150	29	40	219	9
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 6^{\circ}\text{C}$		6	1	6	57	14	8	30	73	4	8	63	3
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 7^{\circ}\text{C}$		1	0	0	18	1	1	7	18	2	2	13	1
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 8^{\circ}\text{C}$		0	0	0	1	1	0	0	2	1	0	3	1
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 9^{\circ}\text{C}$		0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 10^{\circ}\text{C}$		0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 4^{\circ}\text{C}$		665	717	722	719	710	666	696	697	701	669	673	669
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 5^{\circ}\text{C}$		639	684	713	698	692	635	681	685	672	614	656	633
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 6^{\circ}\text{C}$		612	643	702	647	670	598	666	662	630	553	641	586
$\Delta t_{sup \text{ h}} > 6^{\circ}\text{C} \& \text{ Rain}$		6	1	6	13	14	8	30	71	10	8	60	5

Tabella 18 : Dati temperature esposizione Sud per il periodo di 1 anno

		Nazioni											
		Italia			Spagna			Francia	Portogallo	Svizzera	Turchia		
h/anno		Milano	Palermo	Roma	Barcellona		Santander	Madrid		Marsiglia	Lisbona	Locarno	Istanbul
	Limiti	M.NORM	M.NORM	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	M.NORM	WUFI	M.NORM	WUFI	WUFI	M.NORM
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 4^{\circ}\text{C}$		1166	1099	1445	1539	1208	1041	1402	1888	1502	1415	1457	660
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 5^{\circ}\text{C}$		824	597	1020	1063	878	717	984	1425	1046	942	953	342
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 6^{\circ}\text{C}$		543	326	674	738	681	485	667	1039	663	593	538	197
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 7^{\circ}\text{C}$		337	168	438	513	518	316	446	723	433	348	294	107
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 8^{\circ}\text{C}$		226	83	289	345	384	211	295	496	249	209	165	48
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 9^{\circ}\text{C}$		157	33	185	199	282	130	197	339	118	132	87	18
$\Delta t_{sup \text{ orario}} > 10^{\circ}\text{C}$		94	18	111	84	213	72	128	215	48	78	35	7
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 4^{\circ}\text{C}$		675	719	722	728	716	669	697	698	717	705	680	709
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 5^{\circ}\text{C}$		649	709	717	722	702	638	687	687	706	688	662	688
$\Delta t_{sup \text{ 12 ore}} > 6^{\circ}\text{C}$		630	702	710	709	685	621	678	681	696	674	653	656
$\Delta t_{sup \text{ h}} > 6^{\circ}\text{C} \& \text{ Rain}$		543	314	671	/	681	484	663	1033	/	592	535	/

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 19 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione invernale

	Marsiglia		Milano		Palermo		Roma		Barcellona	
	North	South	North	South	North	South	North	South	North	South
$\Delta T_h$	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter
<b>Inverno (ottobre - marzo)</b>										
>4°C	12	861	45	571	4	651	19	815	1	859
>5°C	4	709	16	450	1	436	2	650	1	681
>6°C	0	535	2	351	0	280	0	490	0	526
>7°C	0	410	0	260	0	157	0	366	0	398
>8°C	0	308	0	192	0	81	0	259	0	302
>9°C	0	196	0	138	0	33	0	174	0	215
>10°C	0	128	0	87	0	18	0	109	0	144
>6°C & rain	0	0	2	351	0	268	0	488	0	0
$\Delta T_{12h} > 4^\circ C$	350	351	301	311	351	353	356	356	347	352
>5°C	337	344	276	286	320	344	347	351	336	346
>6°C	312	338	252	271	281	337	336	344	308	337
>7°C	277	333	225	260	209	316	327	343	252	329
>8°C	215	324	193	243	142	298	306	333	171	323
>9°C	143	319	156	234	80	285	262	327	85	319
>10°C	81	308	123	229	37	270	201	317	35	312
>15°C	0	265	11	168	0	207	10	263	0	261

Tabella 20 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione invernale

	Madrid		Santander		Istanbul		Locarno		Lisbona	
	North	South	North	South	North	South	North	South	North	South
$\Delta T_h$	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter	Winter
<b>Inverno (ottobre - marzo)</b>										
>4°C	17	765	16	569	10	481	246	818	0	776
>5°C	6	595	9	442	2	351	90	619	0	604
>6°C	2	457	1	347	0	267	21	415	0	456
>7°C	1	346	0	260	0	202	5	259	0	319
>8°C	0	267	0	188	0	152	0	158	0	202
>9°C	0	189	0	117	0	105	0	85	0	131
>10°C	0	126	0	65	0	70	0	35	0	78
>6°C & rain	2	455	0	0	0	0	21	415	0	455
$\Delta T_{12h} > 4^\circ C$	334	335	307	310	323	330	327	332	305	341
>5°C	319	325	277	281	300	309	317	323	251	325
>6°C	305	316	250	267	253	272	305	317	194	312
>7°C	260	309	197	256	214	255	296	314	143	303
>8°C	208	301	150	241	177	236	282	308	91	295
>9°C	136	292	96	234	127	214	268	299	52	285
>10°C	71	281	58	219	82	206	255	297	31	278
>15°C	0	217	0	162	0	146	128	265	0	239

Durante l'Inverno l'escursione termica tra l'esposizione Nord e quella Sud, per ogni città analizzata è enorme. Un esempio che ben rappresenta questa condizione è Lisbona che per l'orientamento Nord in inverno non ha  $\Delta T_h > 4^\circ C$ ; come Lisbona anche Palermo e Barcellona che hanno rispettivamente 5 e 2 ore in cui si ha un  $\Delta T_h > 4^\circ C$ .

Le città che superano le 800 h di  $\Delta T_h > 4^\circ C$  sono Marsiglia, Roma e Barcellona e restano costanti i valori con l'aumentare dei  $\Delta T$ , fino ad arrivare al limite  $\Delta T_h > 10^\circ C$ .

La grossa differenza sono le 488 h in cui si ha un  $\Delta T_h > 6^\circ C$  con la presenza della pioggia di Roma, e le 455 di Madrid e Lisbona per l'esposizione Sud. La pioggia infatti è la responsabile principale dei disagi sugli ETICS perchè cambia tutte le proprietà legate ai pori di un materiale: la resistenza a



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

compressione e trazione diminuiscono, aumenta l'assorbanza solare e si alzano i valori della conduttività termica diminuendo quindi nel tempo la proprietà di isolamento.

E' normale avere  $\Delta T_{12h} > 4^{\circ}\text{C}$  lungo l'arco di una giornata; il valore limite in questo caso è 365 ore a stagione. I valori dei  $\Delta T_{12h}$  risultano pressochè costanti per entrambe le esposizioni sia in inverno che in estate.

Tabella 21 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione estiva

	Marsiglia		Milano		Palermo		Roma		Barcellona	
	North	South	North	South	North	South	North	South	North	South
$\Delta T_h$	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer
<b>Estate (aprile - settembre)</b>										
> 4°C	114	598	101	595	66	448	141	630	104	523
> 5°C	53	364	41	374	19	161	50	370	41	296
> 6°C	10	192	4	192	1	46	6	184	13	155
> 7°C	0	79	1	77	0	11	0	72	1	63
> 8°C	0	38	0	34	0	2	0	30	0	17
> 9°C	0	11	0	19	0	0	0	11	0	2
> 10°C	0	7	0	7	0	0	0	2	0	0
> 6°C & rain	0	0	4	192	1	46	6	183	0	0
$\Delta T_{12h} > 4^{\circ}\text{C}$	366	366	364	364	366	366	366	366	366	366
> 5°C	366	365	363	363	364	365	366	366	365	366
> 6°C	364	364	360	359	362	365	366	366	365	365
> 7°C	364	364	351	353	349	363	366	365	360	361
> 8°C	358	359	340	342	324	359	364	364	342	356
> 9°C	342	357	329	338	274	355	363	362	316	348
> 10°C	306	354	322	328	197	349	358	358	243	340
> 15°C	14	298	113	271	0	291	146	326	5	247

Tabella 22 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione estiva

	Madrid		Santander		Istanbul		Locarno		Lisbona	
	North	South	North	South	North	South	North	South	North	South
$\Delta T_h$	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer	Summer
<b>Estate (aprile - settembre)</b>										
> 4°C	161	637	76	472	97	478	309	639	130	639
> 5°C	83	389	29	275	37	293	129	334	40	338
> 6°C	28	210	7	138	5	141	42	123	8	137
> 7°C	6	100	1	56	0	58	8	35	2	29
> 8°C	0	28	0	23	0	23	3	7	0	7
> 9°C	0	8	0	13	0	12	0	2	0	1
> 10°C	0	2	0	7	0	7	0	0	0	0
> 6°C & rain	28	208	0	0	0	0	39	120	8	137
$\Delta T_{12h} > 4^{\circ}\text{C}$	362	362	359	359	363	362	346	348	364	364
> 5°C	362	362	358	357	361	362	339	339	363	363
> 6°C	361	362	348	354	352	359	336	336	359	362
> 7°C	360	360	338	346	342	351	328	329	354	362
> 8°C	358	357	318	331	332	340	318	320	346	358
> 9°C	352	356	288	321	324	331	308	313	321	353
> 10°C	343	351	243	300	296	326	298	308	273	350
> 15°C	30	301	7	205	48	253	233	273	33	316

In Estate l'escursione termica è inferiore a quella invernale, infatti Madrid passa da 765h a 637h di  $\Delta T_h > 4^{\circ}\text{C}$ .

Madrid , Lisbona, Locarno e Roma hanno gli stessi valori di escursione esterna per l'esposizione sud e valori simili per l'esposizione nord.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Come nella condizione invernale i valori dei  $\Delta T_{12h}$  rimangono costanti per le esposizioni nord e sud anche in estate.

Abbiamo notato che sulle 12 ore le differenze di temperatura per le sole classi  $> 4,5,6$  °C rimanevano quasi costanti, così abbiamo deciso di aumentare i range di analisi fino a 10°C e abbiamo verificato che i valori venivano modificati di poco. Così è stata aggiunto da ultimo il limite  $\Delta T_{12h} > 15$ °C e si è potuto vedere una sensibile diminuzione delle ore soprattutto riguardante l'esposizione nord.

Il  $\Delta T_{12h}$  è un valore significativo perchè non ci dà le stesse informazioni nell'immediato "sul nostro ETICS" di  $\Delta T_n$  ma ci dà un'idea dei cicli giorno/notte – caldo/freddo che occorrono durante una giornata e quindi a che tipo di sollecitazioni è soggetto nel tempo.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Un esempio di come appaiono graficamente i dati riportati nelle tabelle precedenti per la città di Barcellona:

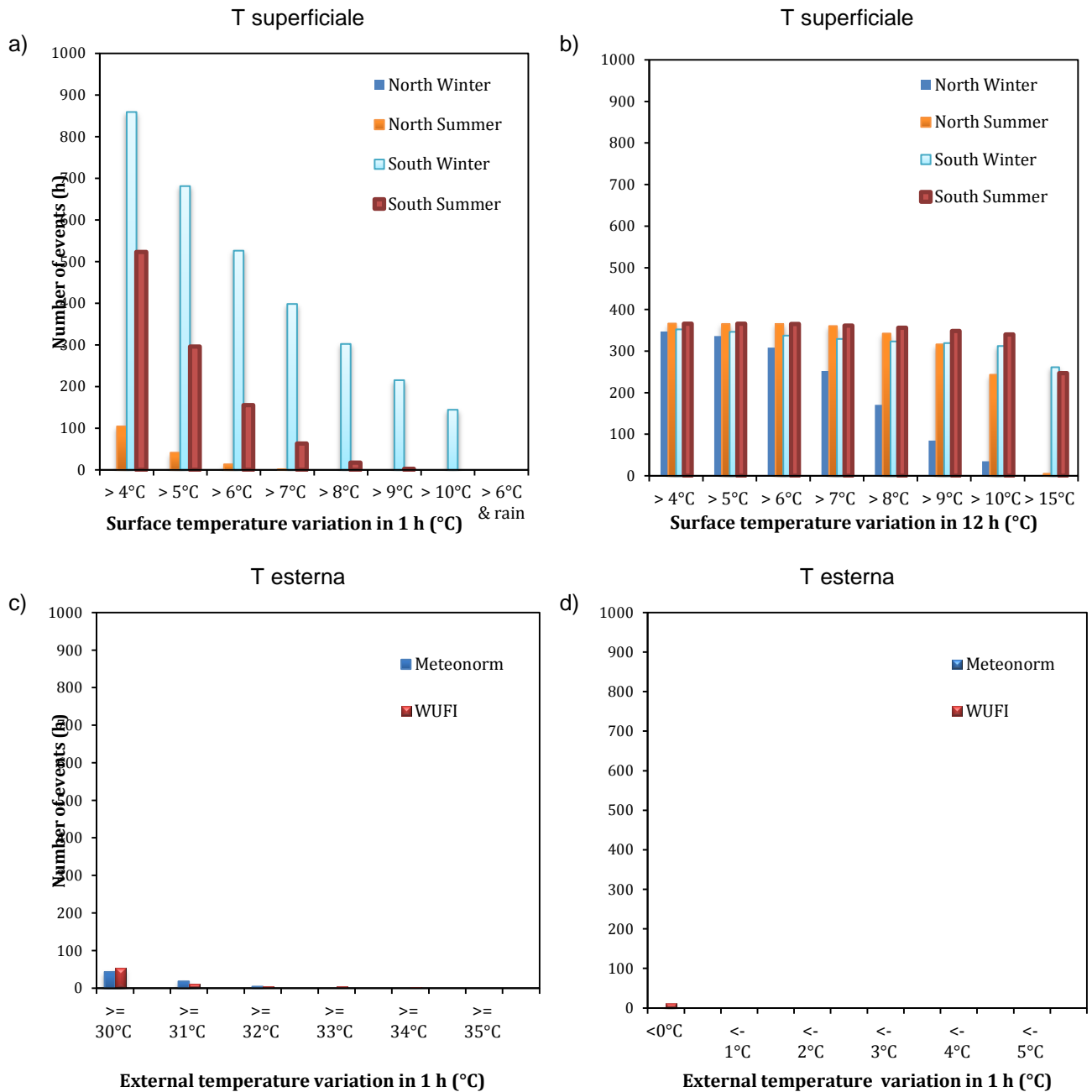


Figura 20 : I grafici 5.a e 5.b riportano le frequenze delle differenze di temperature esterne superficiali nei periodi estivi e invernali per le esposizioni Nord e Sud, i grafici 5.c e 5.d riportano il confronto tra dati M.Norm e WUFI per le frequenze di temperature esterne superficiali.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Confronto WUFI – Meteonorm

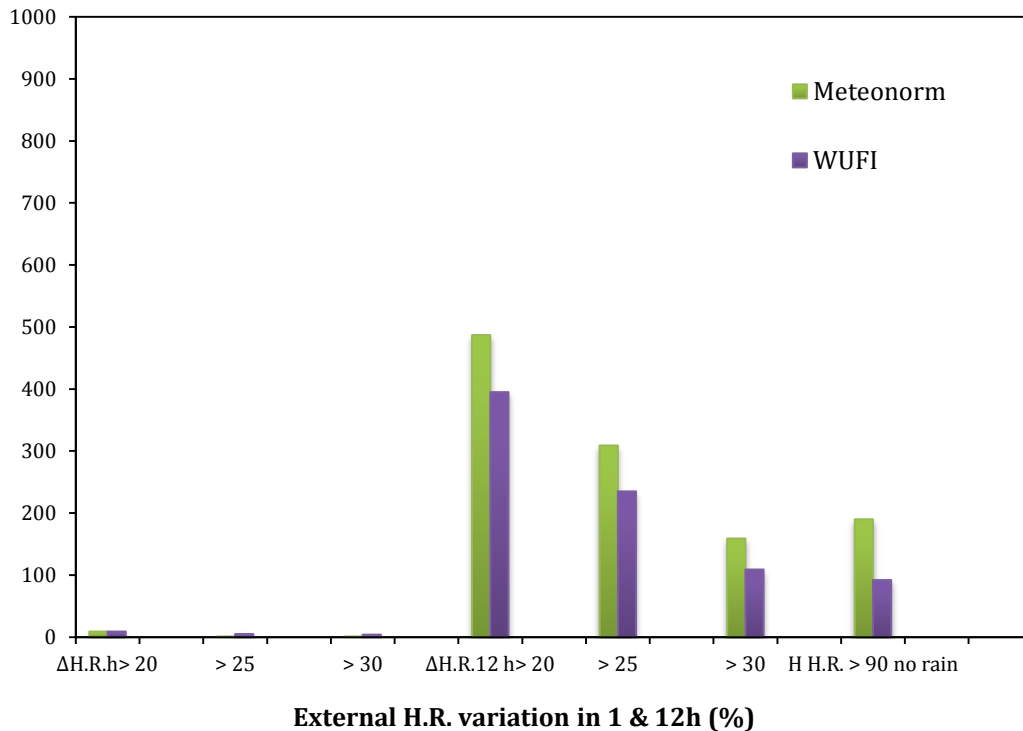


Figura 21 : Confronto dati umidità relativa WUFI – M.NORD

I grafici di Figura 20.c, Figura 20.d e Figura 21 fanno un confronto tra i dati ricavati da WUFI e gli ultimi degli archivi Meteonorm. I grafici di Figura 20.a e Figura 20.b riportano le frequenze delle temperature superficiali estive (Aprile - Settembre) e invernali (Ottobre – Marzo) orarie (a) e sulle 12 ore (b) per le esposizioni Nord e Sud.

Nei grafici Figura 20.c, Figura 20.d si nota che le frequenze rilevate sono differenti per i motivi spiegati in precedenza (WUFI ha a disposizione solo un “anno climatico” in cui possono essersi presentate anche condizioni estreme per quel che riguarda la pioggia, la temperatura o l’umidità) ma non si discostano di molto.

Nel grafico di Figura 21 si nota invece che le frequenze sull’umidità relativa esterna si discostano le une dalle altre di circa un centinaio di ore.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### 5.2.2 Analisi parametrica preliminare

La seconda parte di questo step di analisi è costituita da una prima prova di analisi parametrica sull'ETICS. La stratigrafia nuova presenta un isolante a doppia densità da 3 + 7 cm (alta densità + bassa densità) e l'introduzione di nuovi materiali che serviranno poi per le fasi successive.

E' stata scelta come città campione Barcellona. L'analisi si è svolta considerando per il momento due sole esposizioni, Nord e Sud, e tutti i livelli di assorbanza, da 0.01 (assorbanza nulla) a 0.99 (assorbanza massima) pur essendo questi ultimi due casi soltanto ideali nella realtà.

Gli intervalli considerati vanno da 0.2 a 0.8 con step di 0.1.

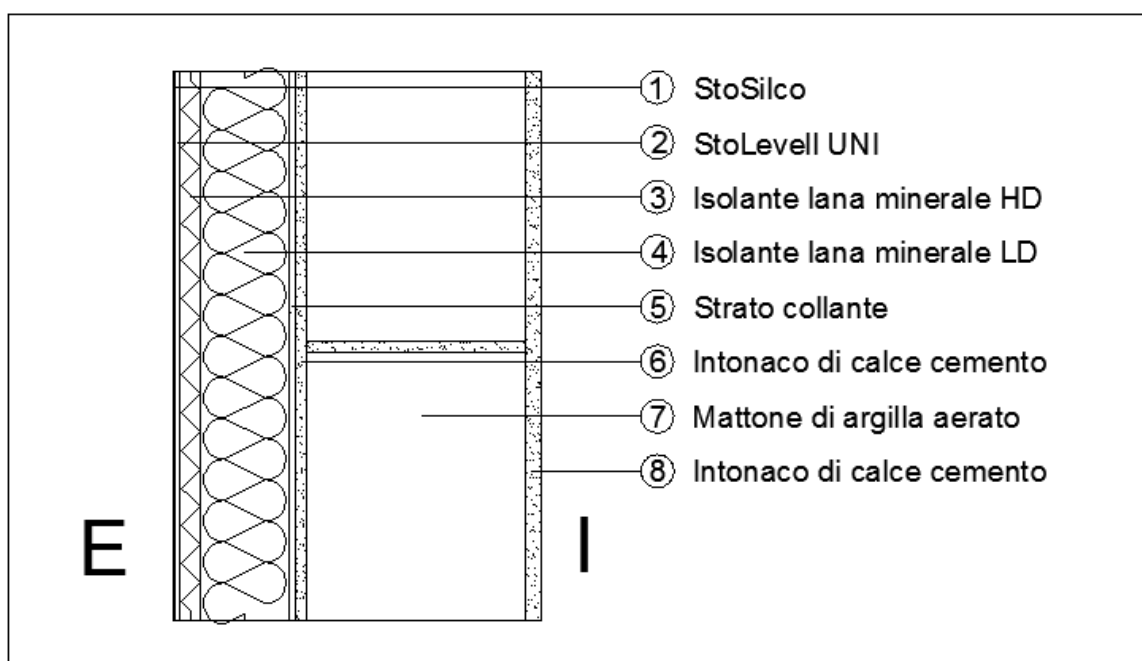


Tabella 23 : Proprietà materiali ETICS

ETICS						
	Sp.	$\rho$	$\lambda_{DRY, @10^{\circ}C}$	$\mu$	Porosity	
	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	
Ext						
1	Sto Silco	0.002	1340	0.7	150	0.36
2	Sto Levell Uni	0.005	1200	0.87	25	0.36
3	MW ( alta densità)	0.03	146	0.033	1.1	0.95
4	MW ( bassa densità)	0.07	71	0.032	1.2	0.95
5	Intonaco	0.01	1900	0.8	19	0.24
6	Laterizio	0.2	650	0.13	15	0.74
7	Intonaco	0.015	1900	0.8	19	0.24
Int						

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

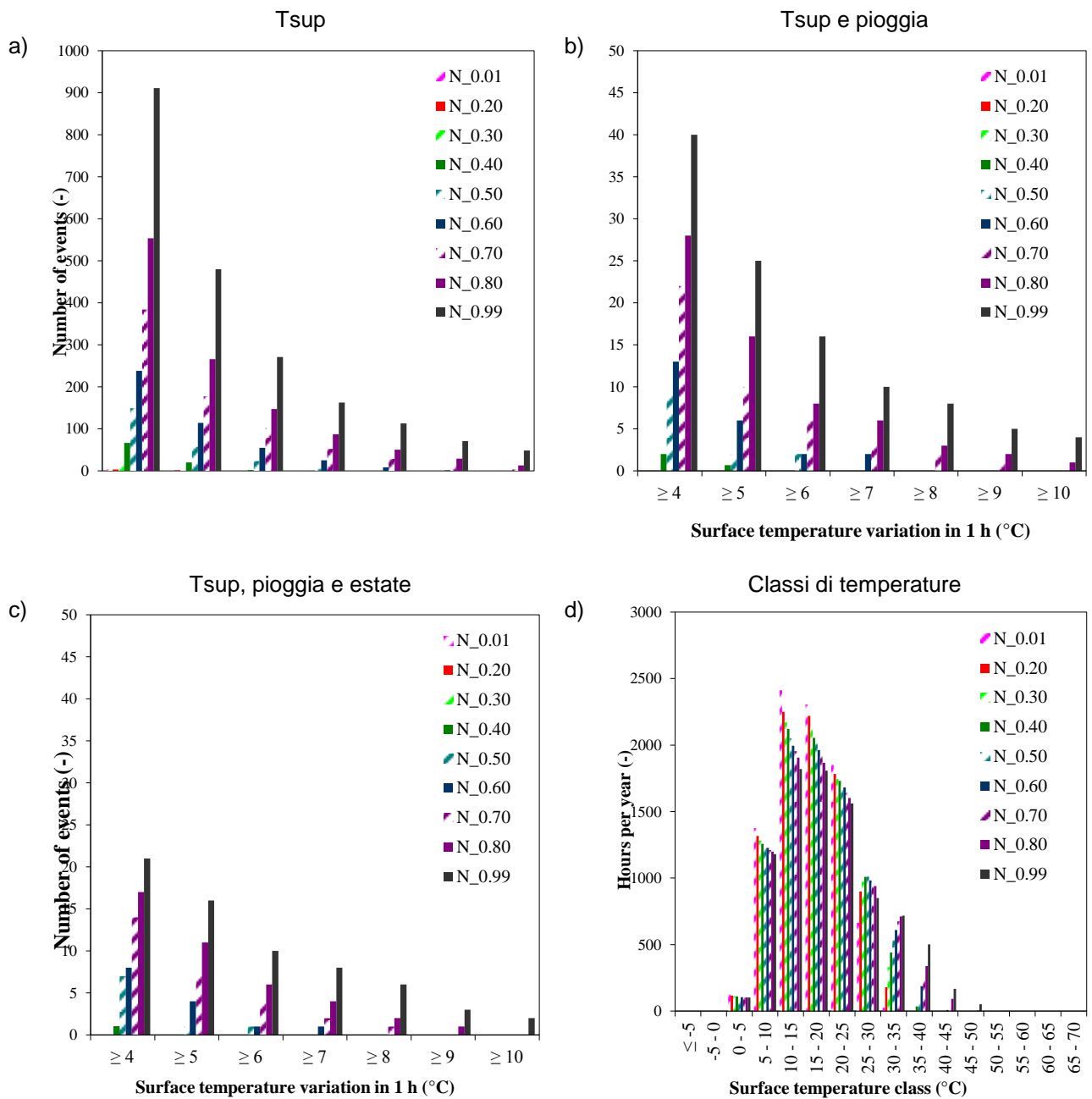


Figura 22 : Grafici per l'esposizione Nord della città di Barcellona

Il grafico di Figura 22.a rappresenta l'andamento delle temperature superficiali orarie per i diversi valori di assorbanze solari lungo l'arco di 1 anno per l'esposizione Nord; il grafico di Figura 22.b riporta il numero di ore delle temperature superficiali con l'aggiunta di pioggia.

Nel grafico di Figura 22.c è riportato il numero di ore in cui vi è la compresenza della stagione estiva e pioggia; nel grafico di Figura 22.d sono rappresentate invece le classi di temperature per tutto lo spettro di assorbanze.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

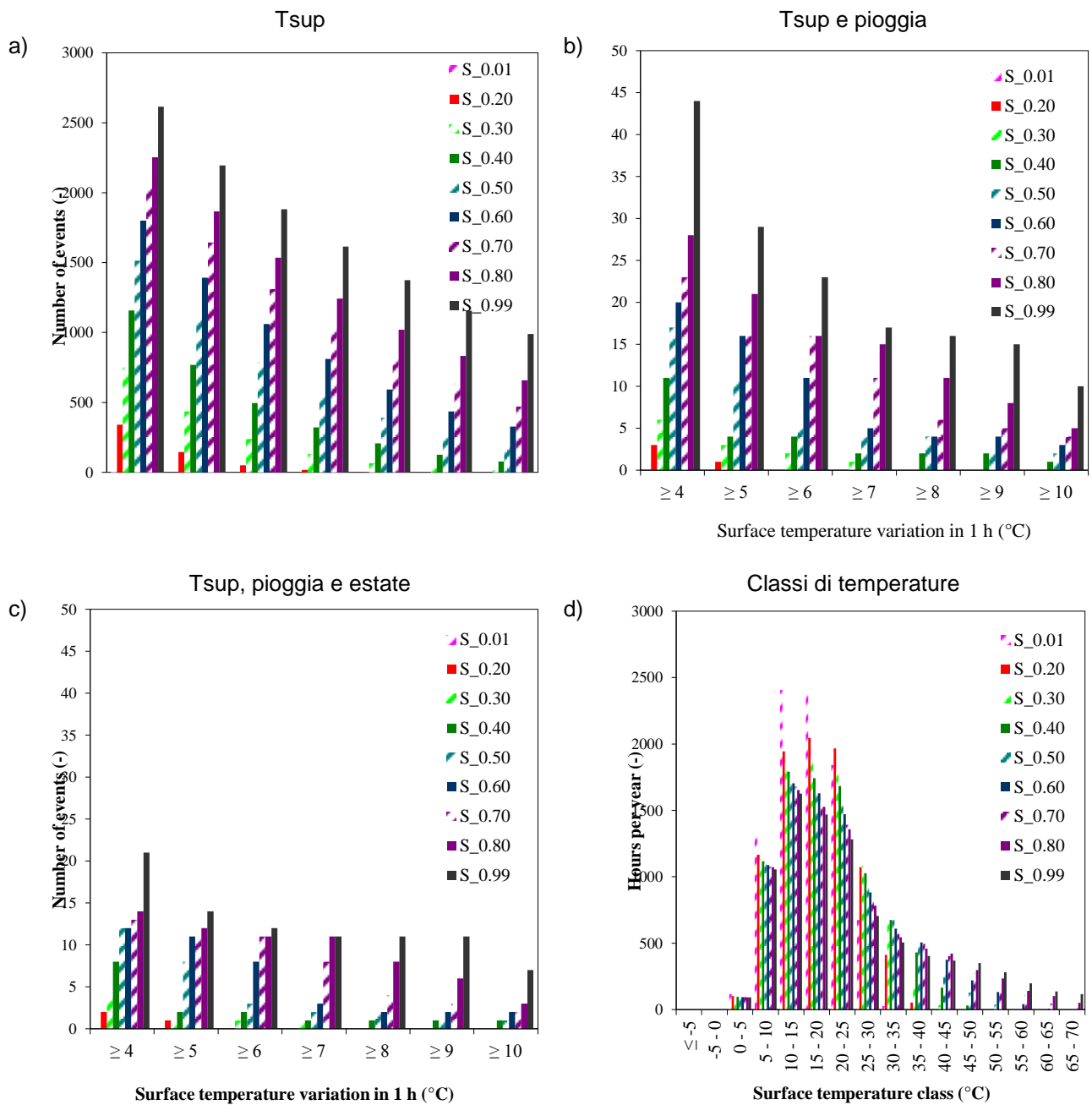


Figura 23 : Grafici per l'esposizione Sud della città di Barcellona

Il grafico di Figura 23.a rappresenta l'andamento delle temperature superficiali orarie per i diversi valori di assorbance solari lungo l'arco di 1 anno per l'esposizione Sud; il grafico di Figura 23.b riporta il numero di ore delle temperature superficiali con l'aggiunta di pioggia.

Nel grafico di Figura 23.c è riportato il numero di ore in cui vi è la presenza della stagione estiva e pioggia; nel grafico di Figura 23.d sono rappresentate invece le classi di temperature per tutto lo spettro di assorbance.

### 5.3 Analisi parametrica



Figura 24: Città italiane analizzate

In questa terza fase il numero delle città prese in considerazione è diminuito ancora, passando dalle precedenti 10 fino alla scelta finale di Milano, Roma e Palermo.

La stratigrafia dell'ETICS è stata definita di tutti i materiali che lo compongono e le proprietà specifiche di ognuno sono il più complete possibile; per alcuni materiali sono stati approssimati dei valori, a causa della mancanza di prove effettuate. Per quanto riguarda il data set climatico, si è scelto di utilizzare quello METENORM, per la sua completezza di informazioni.

Avendo a disposizione dati precisi, anche l'analisi può entrare più del dettaglio, così si è scelto di valutare le condizioni a cui è soggetto l'ETICS sotto un maggior numero di prospettive. Infatti si prendono in considerazione le quattro esposizioni Nord, Sud, Ovest ed Est e tutto lo spettro di assorbanze solari  $\alpha$  da 0,01 a 0,99. Questo ci permette di confrontare più valori possibili e capire al meglio gli scenari, gli agenti e le azioni che si potrebbero presentare nel corso di un intero anno.

La nostra attenzione si concentra sugli shock termici, un rapido cambiamento della temperatura circostante che può essere causato da diversi motivi: la pioggia, il passaggio dal dì alla notte, dall'inverno all'estate, la nuvolosità, il vento...etc

Abbiamo svolto cinque diversi studi, partendo da una condizione più generale, filtrando sempre di più i dati per poter studiare la frequenza e l'intensità con cui questi fenomeni si presentano:

- $\Delta$  Temperature Superficiali
- $\Delta$  Temperature Superficiali con la presenza della Pioggia
- $\Delta$  Temperature Superficiali con la presenza della pioggia in estate
- $\Delta$  Temperature Superficiali alle alte Temperature ( $\geq 40^\circ\text{C}$ )
- $\Delta$  Temperature Superficiali per Classi di Temperature



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

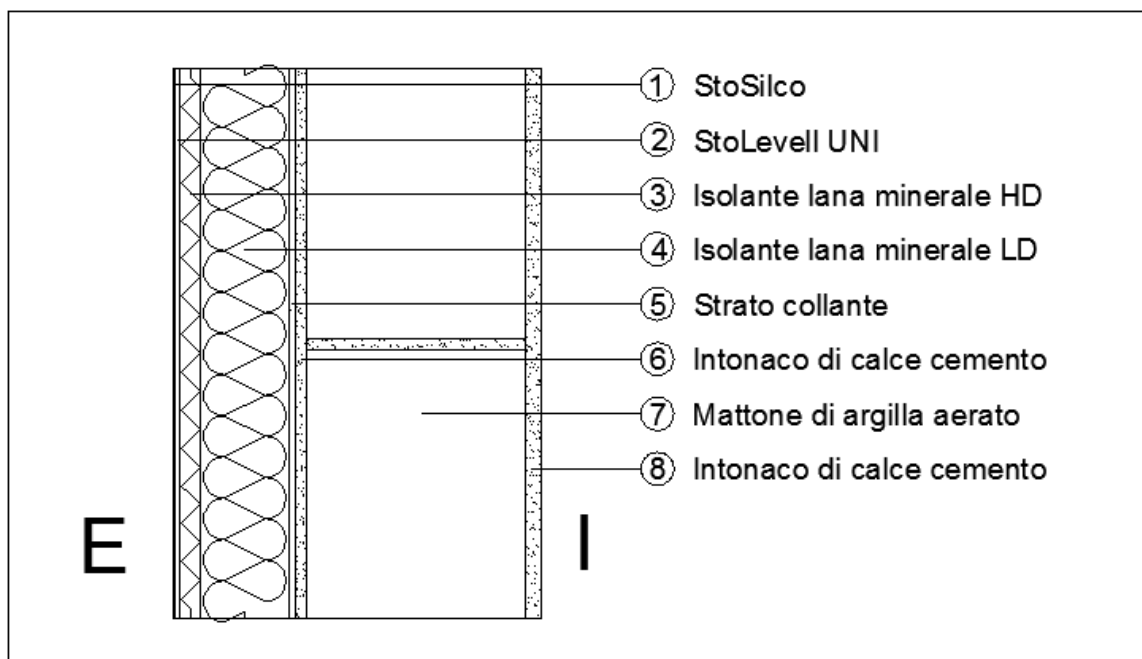


Tabella 24 : Proprietà materiali ETICS

ETICS						
	Sp.	$\rho$	$\lambda_{DRY, @10^{\circ}C}$	$\mu$	Porosity	
	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	
Ext						
1	Sto Silco	0.002	1340	0.7	150	0.36
2	Sto Levell Uni	0.005	1200	0.87	25	0.36
3	MW ( alta densità)	0.018	146	0.033	1.1	0.95
4	MW ( bassa densità)	0.082	71	0.032	1.2	0.95
5	Strato collante	0.005	833	0.155	15	0.686
6	Intonaco di calce cemento	0.01	1900	0.8	19	0.24
7	Laterizio	0.2	650	0.13	15	0.74
8	Intonaco di calce cemento	0.015	1900	0.8	19	0.24
Int						

Questo tipo di ETICS ha come isolante una lana minerale a doppia densità; lo stesso tipo di stratigrafia si può associare alle simulazioni svolte con l'EPS come strato isolante.

In questa terza parte è stato infatti aggiunto questo tipo di confronto tra lana minerale e EPS per studiare il comportamento di entrambi sotto gli effetti degli agenti climatici. Vengono riportati entrambi i casi studiati per il clima di Milano.

A seguito un'analisi aggiuntiva è stata fatta sul contenuto d'acqua presente in ogni strato componente l'ETICS.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

5.3.1 *Simulazioni con ETICS in Lana Minerale*

5.3.1.1 *Analisi della frequenza e intensità degli shock termici*

Questa analisi rappresenta l'andamento delle Temperature Superficiali del Sistema ETICS preso in esame valutati sui quattro punti cardinali e per lo spettro di assorbanza solare. Abbiamo preceduto con il conteggio delle ore durante l'arco di un intero anno in cui si presentava uno shock termico. I limiti fissati sono  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$ ,  $5^\circ\text{C}$  fino a  $10^\circ\text{C}$ . Come si può notare, più è alto  $\alpha$ , più aumentano per i valori. I più alti sono quelli per  $\alpha=0,99$ , anche se non è un valore reale.

Tabella 25: Milano\_  $\Delta T$ \_Nord MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$								
	N_0.01 *	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
$\geq 4$	0	0	7	49	137	268	442	614	985
$\geq 5$	0	0	0	5	36	86	167	241	500
$\geq 6$	0	0	0	1	6	34	69	122	243
$\geq 7$	0	0	0	0	1	7	30	59	141
$\geq 8$	0	0	0	0	0	1	9	30	82
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	1	9	44
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	1	28

Tabella 26: Milano\_  $\Delta T$ \_Sud MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$								
	S_0.01 *	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
$\geq 4$	0	258	612	929	1211	1507	1748	1975	2308
$\geq 5$	0	100	311	589	843	1085	1328	1550	1892
$\geq 6$	0	29	160	349	575	809	1005	1195	1563
$\geq 7$	0	5	74	210	369	575	780	948	1268
$\geq 8$	0	2	33	123	247	396	576	757	1052
$\geq 9$	0	1	10	65	162	276	425	579	872
$\geq 10$	0	0	5	37	100	204	299	430	713

\* I valori del coefficiente di assorbimento solare  $\alpha = 0.01$  e  $\alpha = 0.99$  non rappresentano valori reali ma servono come riferimenti estremi (fondo scala) per poter confrontare tutti gli altri coefficienti dello spettro di assorbanze.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 27: Milano\_ΔT\_Ovest MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
≥ 4	0	170	384	623	821	1043	1275	1536	2006
≥ 5	0	88	206	402	580	744	881	1035	1358
≥ 6	0	40	142	250	421	561	687	808	1025
≥ 7	0	13	90	175	287	431	555	662	849
≥ 8	0	4	52	124	198	313	437	550	735
≥ 9	0	1	28	92	157	223	331	442	618
≥ 10	0	1	15	57	118	181	244	346	534

Tabella 28: Milano\_ΔT\_Est MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
≥ 4	0	230	395	540	693	828	986	1182	1525
≥ 5	0	100	267	393	512	649	763	891	1131
≥ 6	0	36	176	292	398	499	612	722	908
≥ 7	0	7	97	211	308	403	503	602	784
≥ 8	0	0	49	155	238	321	416	502	665
≥ 9	0	0	20	97	185	263	337	422	566
≥ 10	0	0	2	55	144	214	278	350	504

Contando il numero di eventi che si verificano, notiamo che ci sono valori molto alti, che potrebbero provocare l'invecchiamento del sistema ( Figura 1\_orientamento N,S,O,E).

I valori sono così elevati perchè a questo livello dell'analisi comprendono tutte le possibili cause di abbassamento della temperatura.

Confrontando le tabelle e i quattro grafici che le rappresentano, si nota come a Sud, per tutti i valori di  $\alpha$  si ottengono i valori più alti. Per  $\alpha=0,5$  a Sud per 1211 ore si supera il  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$ , rispetto alle 137 ore che si registrano a Nord. Un differenza di un ordine di grandezza.

Per lo stesso valore di assorbanza solare, a Ovest si raggiungono le 821 ore, simili a quelle misurate a Est che sono 828.

Per  $\alpha=0,6$  invece, il  $\Delta T \geq 9^\circ\text{C}$  non si supera a Nord, mentre invece si registrano valori simili per le altre esposizioni: 276 ore a Sud; 223 ore a Ovest e 263 a Est (Vedi Figura 1).

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

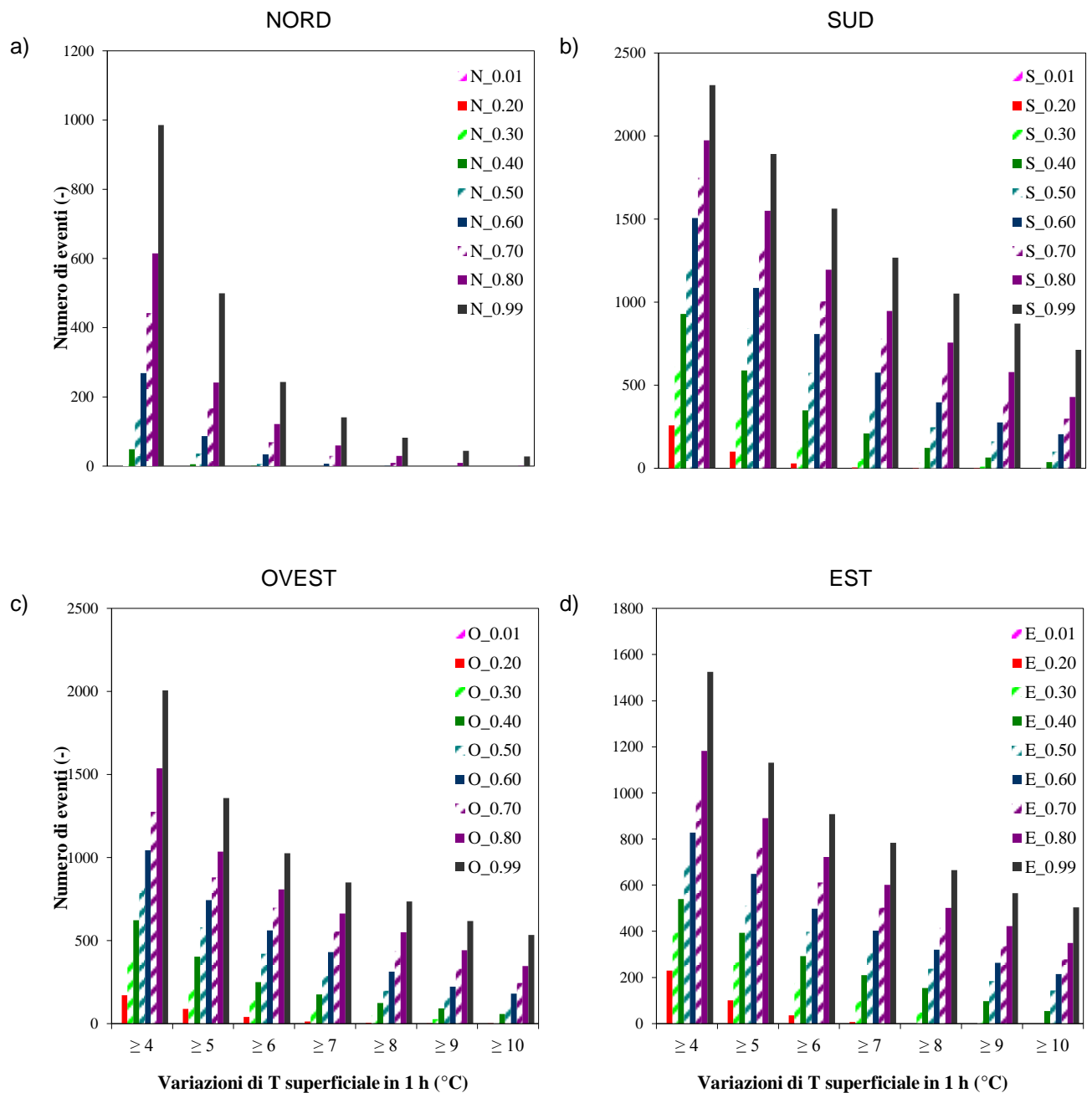


Figura 25: Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### 5.3.1.2 Ananlisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia

La pioggia contribuisce enormemente all'abbassamento repentino della temperatura superficiale sull'intonaco di un cappotto. Quando piove i pori degli strati esterni si riempiono d'acqua, e di conseguenza la conduttività diminuisce e la Temperatura precipita. In questa analisi abbiamo scremato le analisi precedenti, aggiungendo la contemporanea presenza della pioggia. I valori che si ottengono alle varie esposizioni per tutte le assorbanze solari sono parecchio inferiori ai risultati ottenuti per le variazioni che non erano associate alla pioggia.

Tabella 29: Milano\_ ΔT&Pioggia\_Nord MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT & Pioggia								
	N_0.01 *	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
≥ 4	0	0	0	2	10	20	24	26	33
≥ 5	0	0	0	0	2	9	18	22	27
≥ 6	0	0	0	0	0	2	8	15	23
≥ 7	0	0	0	0	0	1	2	7	16
≥ 8	0	0	0	0	0	0	1	3	11
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	1	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Tabella 30: Milano\_ ΔT&Pioggia\_Sud MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT & Pioggia								
	S_0.01 *	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
≥ 4	0	0	0	4	10	20	26	31	40
≥ 5	0	0	0	0	4	9	18	24	32
≥ 6	0	0	0	0	0	5	7	14	26
≥ 7	0	0	0	0	0	1	5	6	19
≥ 8	0	0	0	0	0	0	3	5	10
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	4	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	5

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 31: Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia\_Ovest MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ & Pioggia								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	2	10	20	24	26	33
$\geq 5$	0	0	0	0	2	9	18	22	27
$\geq 6$	0	0	0	0	0	2	8	15	23
$\geq 7$	0	0	0	0	0	1	2	7	16
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	1	3	11
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	1	6
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Tabella 32: Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia\_Est MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ & Pioggia								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	2	10	17	24	34	48
$\geq 5$	0	0	0	0	3	9	14	23	37
$\geq 6$	0	0	0	0	0	3	7	13	28
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	3	7	19
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	2	3	11
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	2	6
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	4

In questo caso le ore contate nell'arco di un intero anno che superano i vari limiti prefissati sono molto inferiori rispetto al caso precedente. Infatti questi valori rientrano nel caso più generale e sono stati tolti dal paniere totale. I risultati sono molto simili per le varie esposizioni; a Nord, come a Sud e Ovest per valori di  $\alpha=0,5$  e  $\alpha=0,6$  si contano 10 e 20 ore di superamento di  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$ . A Ovest la situazione cambia di poco con 10 e 17 ore. Lo step  $\Delta T \geq 5^\circ\text{C}$  si supera dell'ordine delle 20 ore solo per le assorbanze più alte come  $\alpha=0,8$ . Per i limiti più alti invece non vengono registrati valori (Vedi Figura 26).

5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

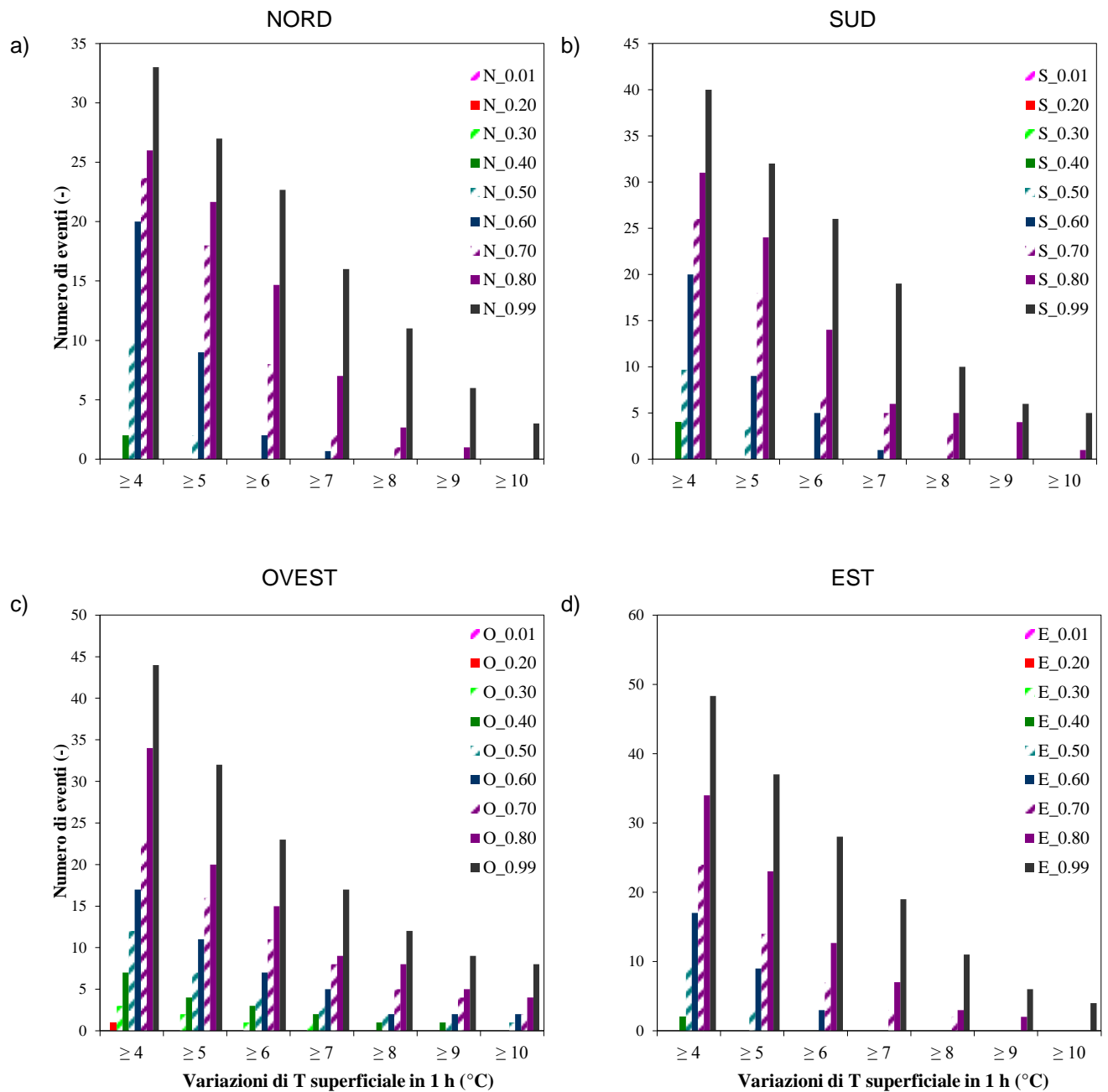


Figura 26 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C quando sta piovendo

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

*5.3.1.3 Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia nella stagione estiva*

Ulteriore condizione ancora più restrittiva: ore in cui si superano i limiti di variazioni di temperatura superficiale, con la contemporanea presenza della pioggia, nel periodo estivo. Abbiamo considerato il periodo che va dal 1 Aprile al 1 Ottobre. Rappresenta un ulteriore filtro rispetto all'analisi precedente; così il valore che si ottiene dalla differenza delle ore di  $\Delta T$ &Pioggia con quelle di  $\Delta T$ &Pioggia&Estate, identifica le ore di superamento dei limiti di temperatura superficiale, con la pioggia, nel periodo invernale.

Tabella 33: Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia&Estate\_Nord MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	1	6	13	14	16	21
$\geq 5$	0	0	0	0	1	6	11	14	16
$\geq 6$	0	0	0	0	0	1	5	9	14
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	1	4	9
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	0	1	8
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	3
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabella 34: Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia&Estate\_Sud MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate								
	S_0.01*	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	3	9	16	21	25	30
$\geq 5$	0	0	0	0	3	8	14	19	26
$\geq 6$	0	0	0	0	0	4	6	12	20
$\geq 7$	0	0	0	0	0	1	4	5	16
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	2	4	8
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	3	5
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	1	4



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 35: Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia&Estate\_Ovest MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate								
	O_0.01 *	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	6	11	14	16	24	30
$\geq 5$	0	0	0	3	6	10	14	15	22
$\geq 6$	0	0	0	2	3	6	10	13	17
$\geq 7$	0	0	0	1	2	4	7	8	15
$\geq 8$	0	0	0	0	1	1	4	7	11
$\geq 9$	0	0	0	0	0	1	3	4	8
$\geq 10$	0	0	0	0	0	1	1	3	7

Tabella 36: Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia&Estate\_Est MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate								
	E_0.01 *	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	2	7	11	17	23	32
$\geq 5$	0	0	0	0	3	7	9	16	25
$\geq 6$	0	0	0	0	0	3	5	10	19
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	3	5	14
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	2	3	9
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	2	4
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Valori significativi si ottengono solo fino al limite  $\Delta T \geq 6^\circ\text{C}$  e per i coefficienti di assorbimento solare fino a 0,8. per i valori al di sotto di 0,4 non sono registrati eventi. Per l'esposizione a Sud con coefficiente  $\alpha=0,7$  per  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$  sono state registrate 26 ore, contro le 14 a Nord mentre a Ovest 16 ore, contro le 17 fatte segnare ad Est (Vedi Figura 3).

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

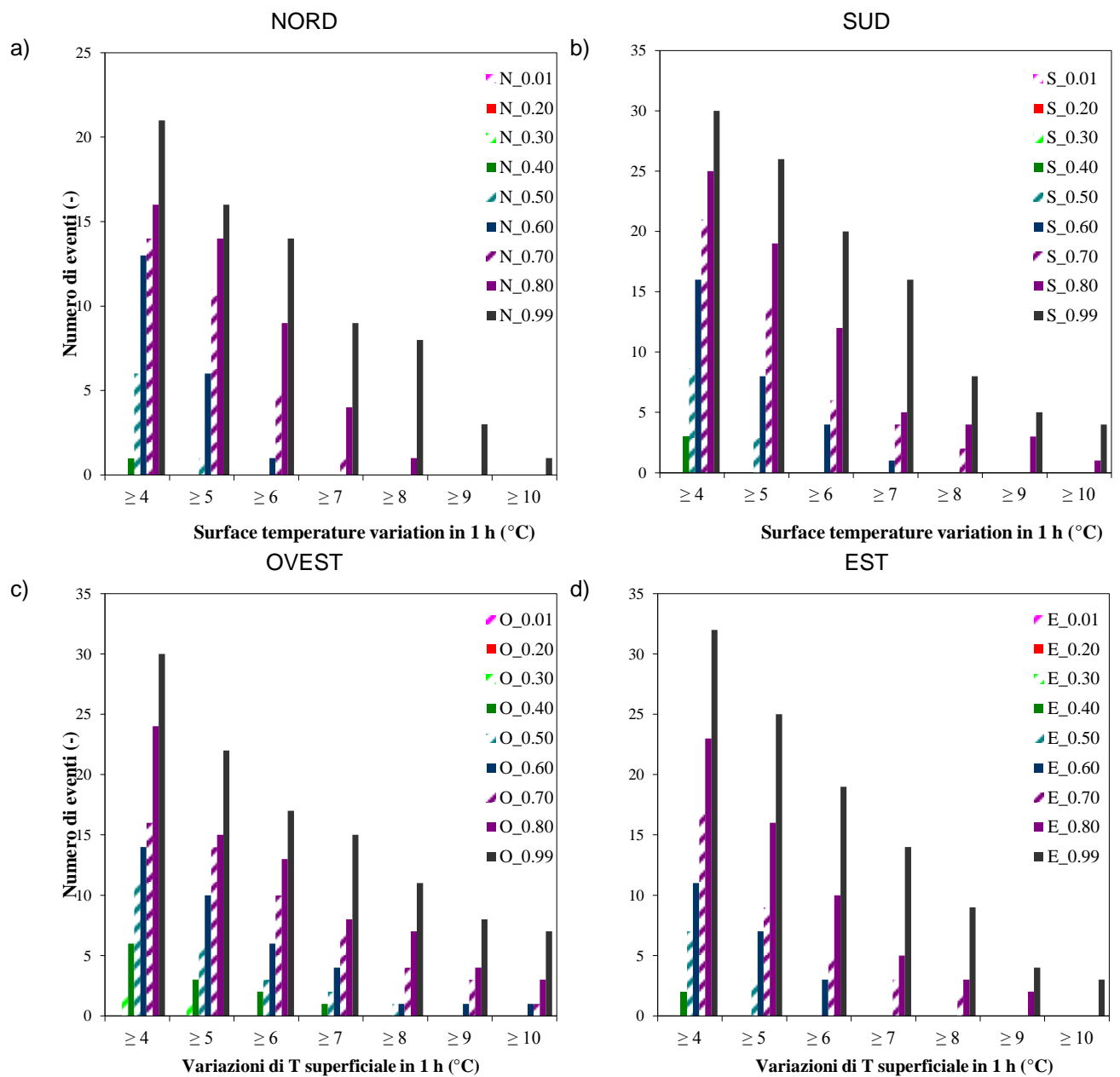


Figura 27 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, durante il periodo estivo.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### 5.3.1.4 Ananlisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia e dalle alte temperature superficiali

A questo punto filtriamo ulteriormente i risultati e valutiamo la condizione in cui oltre alla pioggia, ci siano alte temperature superficiali,  $\geq 40^{\circ}\text{C}$ . In questo caso lo shock termico può essere dovuto ad un rapido abbassamento della temperatura, o ad un repentino aumento.

Tabella 37: Milano\_  $\Delta\text{T}$ &Pioggia&Alte temperature\_Nord MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta\text{T}$ &Pioggia&Tsup $\geq 40^{\circ}\text{C}$								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	0	0	5
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	0	0	5
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	0	0	5
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	0	0	3
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	0	0	3
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabella 38: Milano\_  $\Delta\text{T}$ &Pioggia&Alte temperature\_Sud MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta\text{T}$ &Pioggia&Tsup $\geq 40^{\circ}\text{C}$								
	S_0.01*	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	0	0	8
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	0	0	8
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	0	0	8
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	0	0	6
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Tabella 39: Milano\_  $\Delta\text{T}$ &Pioggia&Alte temperature\_Ovest MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta\text{T}$ &Pioggia&Tsup $\geq 40^{\circ}\text{C}$								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	3	3	9
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	3	3	9
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	3	3	7
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	3	3	7
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	3	3	7
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	2	3	6
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	1	2	6

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 40: Milano\_  $\Delta T$ &Piooggia&Alte temperature\_Est MW

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &Piooggia&Tsup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	1	1	5
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	1	1	4
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	1	1	4
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	1	1	3
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	1	1	3
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	1	3
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	2

A Nord e Sud non si registrano valori, se non per il coefficiente di assorbimento solare  $\alpha=0,99$ .

Per Ovest invece si contano 3 ore per  $\alpha=0,7$  e  $\alpha=0,8$  per i limiti prefissati, mentre invece per Est si arriva ad avere una sola ora per i diversi limiti. Per i limiti con i  $\Delta T$  più alti non si contano eventi per nessuna esposizione e coefficiente di assorbimento. Questo valore è fortemente dipendente dalla collocazione geografica del sito in cui si trova l'edificio (vedi Figura 4).

5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

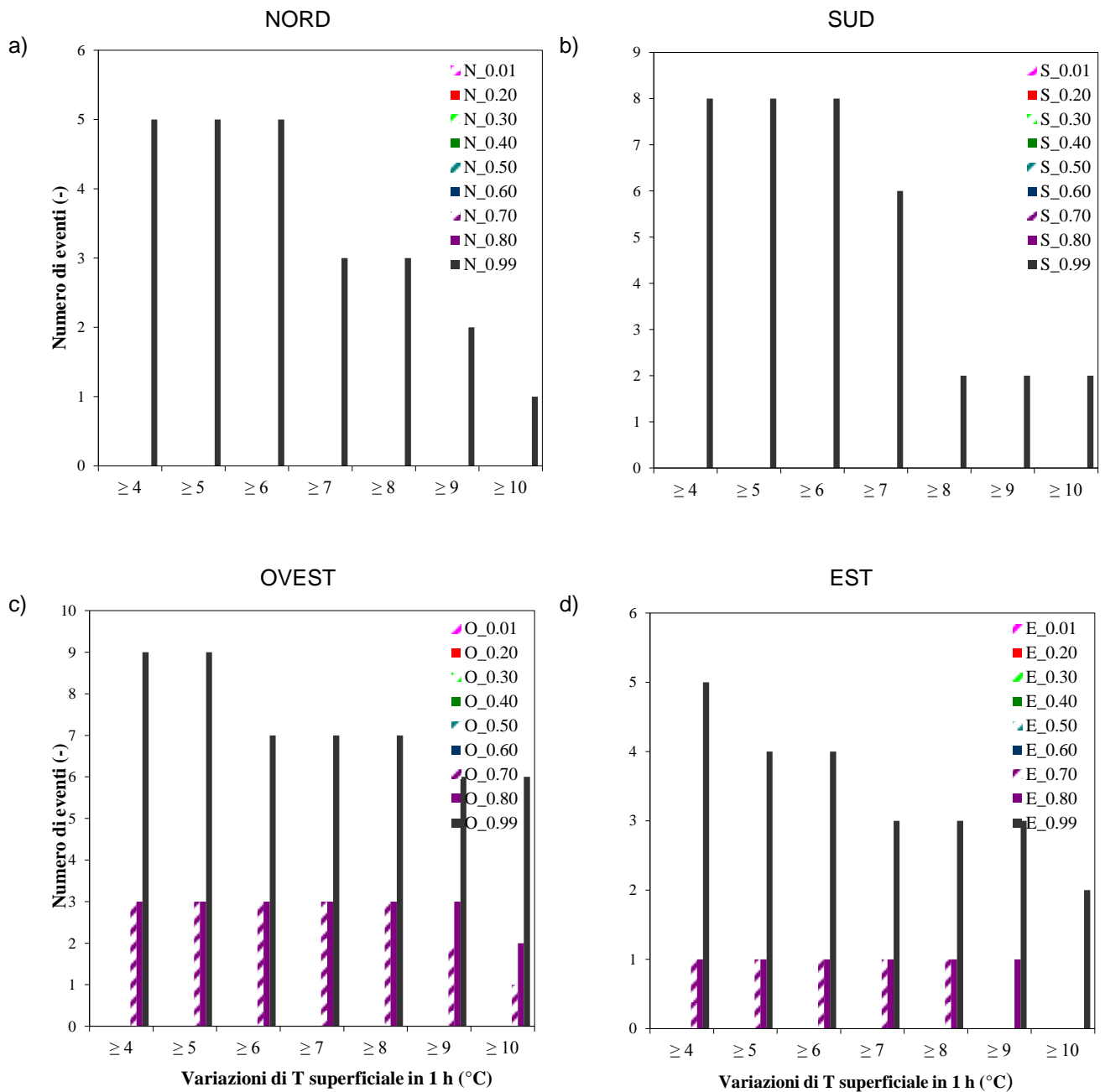


Figura 28: Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, quando la Temperatura Superficiale è  $\geq 40^\circ\text{C}$

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

*5.3.1.5 Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici suddivisi in classi di temperature*

In questa analisi vengono fissate delle vere e proprie classi di distribuzione di temperature all'interno di un intervallo di 5°C, partendo da -5°C, fino ad arrivare ai 70°C. Per ognuno di questi intervalli, associato il relativo coefficiente  $\alpha$ , si riportano le ore in cui la temperatura superficiale ricade all'interno per poter valutare gli sforzi a cui è soggetto l'ETICS.

Tabella 41: Milano\_ΔT Classi di temperature\_Nord MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT Classi di Temperature								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
≤ -5	20	19	19	19	19	19	20	20	19
-5 - 0	603	567	558	552	543	537	529	526	518
0 - 5	1600	1547	1514	1470	1436	1405	1383	1355	1325
5 - 10	1616	1536	1503	1486	1464	1451	1439	1422	1386
10 - 15	1608	1515	1475	1449	1435	1392	1357	1337	1297
15 - 20	1571	1479	1457	1422	1369	1335	1304	1290	1256
20 - 25	1281	1273	1236	1226	1175	1150	1118	1065	1007
25 - 30	441	673	718	721	730	741	741	751	680
30 - 35	19	151	272	364	471	512	520	498	544
35 - 40	0	0	7	51	115	204	294	386	434
40 - 45	0	0	0	0	2	15	56	103	226
45 - 50	0	0	0	0	0	0	0	8	63
50 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 - 70	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 42: Milano\_ΔT Classi di temperature\_Sud MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	S_0.01 *	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
≤ -5	20	19	19	19	19	18	18	18	17
-5 - 0	572	527	513	500	489	480	475	471	467
0 - 5	1599	1443	1403	1347	1344	1328	1310	1285	1255
5 - 10	1631	1466	1413	1380	1357	1326	1310	1309	1276
10 - 15	1626	1480	1407	1339	1300	1264	1241	1204	1182
15 - 20	1566	1504	1431	1374	1317	1275	1209	1178	1130
20 - 25	1269	1263	1210	1133	1061	1022	981	971	918
25 - 30	456	707	713	732	713	680	646	591	545
30 - 35	21	318	458	479	478	473	480	456	426
35 - 40	0	33	175	312	385	362	360	377	332
40 - 45	0	0	18	103	221	309	305	278	317
45 - 50	0	0	0	13	63	158	239	277	231
50 - 55	0	0	0	0	14	48	130	190	220
55 - 60	0	0	0	0	0	17	37	96	193
60 - 65	0	0	0	0	0	1	15	40	125
65 - 70	0	0	0	0	0	0	4	16	66

Tabella 43: Milano\_ΔT Classi di temperature\_Ovest MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT Classi di temperature								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
≤ -5	20	19	19	20	20	20	20	19	19
-5 - 0	589	548	541	532	518	511	502	500	493
0 - 5	1604	1517	1479	1441	1410	1387	1370	1347	1306
5 - 10	1617	1511	1458	1435	1409	1358	1361	1349	1315
10 - 15	1617	1498	1458	1417	1388	1338	1301	1276	1250
15 - 20	1560	1451	1397	1357	1318	1291	1271	1236	1185
20 - 25	1279	1208	1179	1122	1063	1048	1029	999	949
25 - 30	450	629	623	657	674	641	619	603	592
30 - 35	23	293	345	369	400	444	425	439	413
35 - 40	0	82	198	217	220	259	311	328	348
40 - 45	0	4	56	143	187	154	163	200	249
45 - 50	0	0	6	45	111	146	147	126	160
50 - 55	0	0	0	5	37	92	115	126	116
55 - 60	0	0	0	1	5	38	78	88	111
60 - 65	0	0	0	0	2	5	41	77	91
65 - 70	0	0	0	0	0	2	5	37	59

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 44: Milano\_ΔT Classi di temperature\_Est MW

h/anno Limiti	Milano_ΔT Classi di Temperature								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
≤ -5	20	20	19	19	19	19	19	18	18
-5 - 0	584	541	530	521	513	508	504	501	490
0 - 5	1605	1495	1448	1401	1374	1346	1323	1295	1271
5 - 10	1624	1509	1463	1447	1418	1396	1383	1370	1325
10 - 15	161	1478	1449	1407	1347	1306	1251	1234	1206
15 - 20	1575	1416	1365	1315	1299	1282	1259	1229	1171
20 - 25	1266	1265	1174	1131	1070	1017	989	962	925
25 - 30	457	783	755	706	692	705	683	637	585
30 - 35	19	250	463	522	539	472	471	484	483
35 - 40	0	4	90	230	290	359	389	390	381
40 - 45	0	0	3	57	144	183	211	248	302
45 - 50	0	0	0	4	49	112	131	155	184
50 - 55	0	0	0	0	7	45	91	101	128
55 - 60	0	0	0	0	0	9	48	81	91
60 - 65	0	0	0	0	0	1	8	44	85
65 - 70	0	0	0	0	0	0	2	10	62

Per tutte le esposizioni si rileva un andamento abbastanza omogeneo della distribuzione delle classi; infatti i valori aumentano sempre più fino a stabilizzarsi per le temperature comprese tra 0°C e i 30°C, che rappresentano la situazione più frequente. Solo pochi dati sono misurati invece per le classi più alte, tra i 50°C e i 70°C, dati misurati solo per i coefficienti di assorbimento solare > 0,7. Per l'intervallo 20°C – 25°C con α=0,5 la frequenza delle ore è più o meno la stessa: a Nord si registrano 1175 ore, a Sud 1061, a Ovest 1063 a Est 1070. Per l'intorno 40°C-45°C e con α=0,6 invece la situazione è differente: a Nord si misurano 15 ore, come era ipotizzabile, mentre a Sud 309. Per Ovest ed Est i valori sono sullo stesso livello: rispettivamente 154 e 183 ore (vedi Figura 5).



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

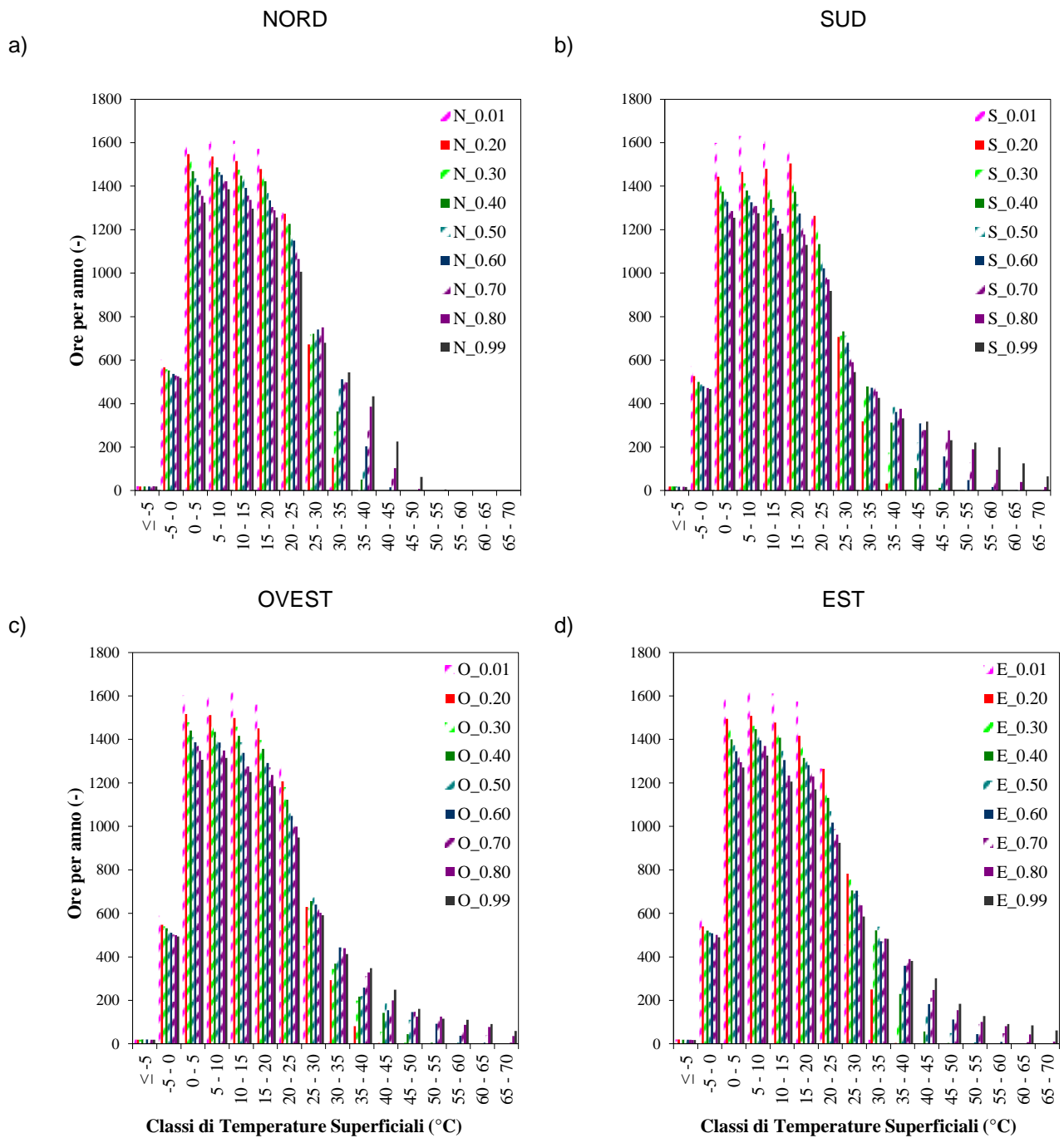


Figura 29: Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS è compresa nelle classi di temperature di 5°C, per le varie esposizioni e assorbanze solari

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

5.3.2 Simulazioni con ETICS in EPS

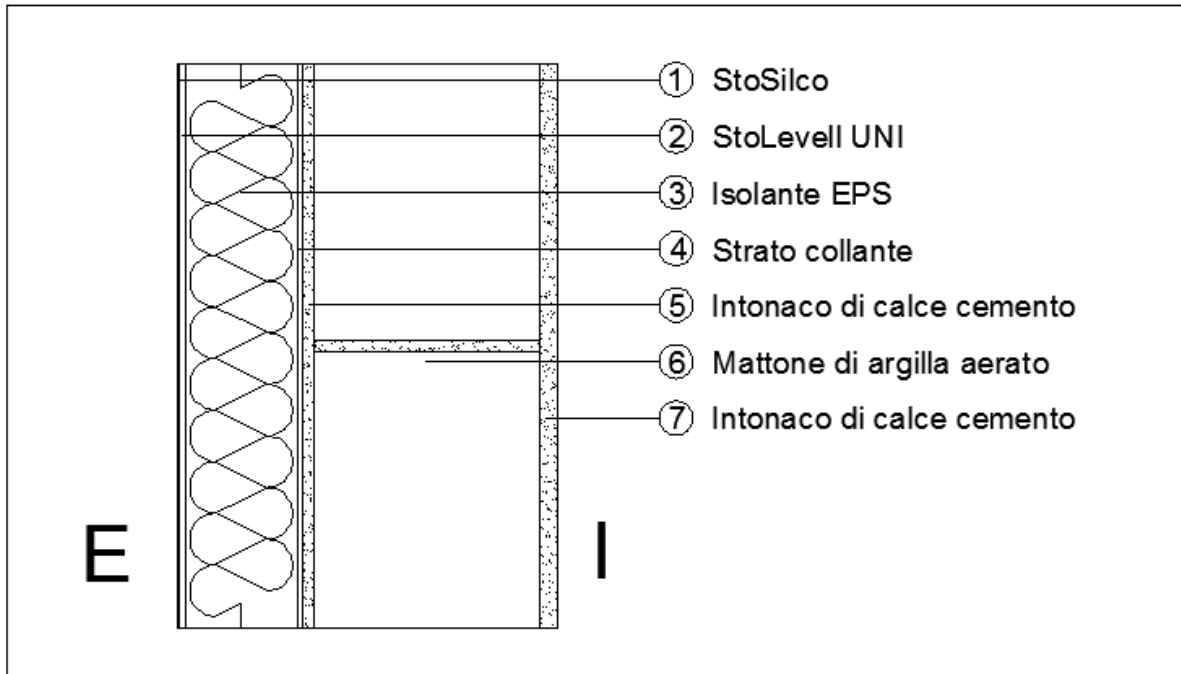


Tabella 45 : Proprietà materiali ETICS

ETICS						
	Sp.	$\rho$	$\lambda_{\text{DRY},@10^{\circ}\text{C}}$	$\mu$	Porosity	
	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]	
Ext						
1	Sto Silco	0.002	1340	0.7	150	0.36
2	Sto Levell Uni	0.005	1200	0.87	25	0.36
3	EPS	0.10	30	0.04	50	0.95
4	Strato collante	0.005	833	0.155	15	0.686
5	Intonaco di calce cemento	0.01	1900	0.8	19	0.24
6	Laterizio	0.2	650	0.13	15	0.74
7	Intonaco di calce cemento	0.015	1900	0.8	19	0.24
Int						

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Sono state svolte le stesse analisi dell'ETICS con la lana minerale, di seguito ne riporteremo le tabelle e i grafici riassuntivi.

### 5.3.2.1 Ananlisi della frequenza e intensità degli shock termici

L'analisi rappresenta l'andamento delle Temperature Superficiali del Sistema ETICS preso in esame valutati sui quattro punti cardinali e per lo spettro di assorbanza solare. Abbiamo preceduto con il conteggio delle ore durante l'arco di un intero anno in cui si presentava uno shock termico. I limiti fissati sono  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$ ,  $5^\circ\text{C}$  fino a  $10^\circ\text{C}$ . Come si può notare, più è alto  $\alpha$ , più aumentano per i valori

Tabella 46 : Milano\_  $\Delta T$ \_Nord EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
$\geq 4$	0	0	14	62	172	304	490	668	1049
$\geq 5$	0	0	1	13	45	105	193	273	538
$\geq 6$	0	0	0	1	12	39	80	140	264
$\geq 7$	0	0	0	0	1	13	38	71	158
$\geq 8$	0	0	0	0	0	1	13	36	93
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	1	15	48
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	1	1	33

Tabella 47 : Milano\_  $\Delta T$ \_Sud EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$								
	S_0.01*	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
$\geq 4$	0	304	657	982	1253	1552	1784	1993	2325
$\geq 5$	0	122	352	632	905	1126	1368	1571	1909
$\geq 6$	0	42	191	388	625	861	1051	1231	1590
$\geq 7$	0	10	91	230	416	622	832	982	1304
$\geq 8$	0	4	45	145	270	433	622	800	1077
$\geq 9$	0	1	17	82	191	303	448	621	904
$\geq 10$	0	1	7	46	121	215	323	459	746

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 48 : Milano\_  $\Delta T$ \_Ovest EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$								
	O_0.01 *	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
$\geq 4$	0	183	421	648	866	1083	1324	1602	2060
$\geq 5$	0	103	236	437	615	770	915	1058	1409
$\geq 6$	0	50	160	282	449	584	721	837	1053
$\geq 7$	0	18	105	190	312	457	576	684	874
$\geq 8$	0	5	58	141	219	338	461	569	752
$\geq 9$	0	2	34	107	169	247	358	464	634
$\geq 10$	0	1	17	66	129	192	278	374	557

Tabella 49 : Milano\_  $\Delta T$ \_Est EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$								
	E_0.01 *	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	246	0	564	721	875	1025	1223	1559
$\geq 5$	0	119	0	407	543	669	803	913	1160
$\geq 6$	0	48	0	306	420	532	649	755	931
$\geq 7$	0	8	0	232	318	429	522	623	802
$\geq 8$	0	1	0	167	260	333	439	521	693
$\geq 9$	0	0	0	114	205	279	354	447	591
$\geq 10$	0	0	0	64	155	222	296	370	510

Contando il numero di eventi che si verificano, notiamo che ci sono valori molto alti, che potrebbero provocare l'invecchiamento del sistema ( Figura 1\_ orientamento N,S,O,E).

I valori sono così elevati perchè a questo livello dell'analisi comprendono tutte le possibili cause di abbassamento della temperatura. Confrontando le tabelle e i quattro grafici che le rappresentano, e quelli dell'ETICS con l'isolamento con lana minerale si nota come a Sud, per tutti i valori di  $\alpha$  si ottengono i valori più alti. Per  $\alpha=0,5$  a Sud per 1253 ore si supera il  $\Delta T \geq 4^\circ C$ , contro le 1211 della lana minerale, mentre a Nord si registrano 172 ore ( 137 ore per la MW). Un differenza di un ordine di grandezza. Per lo stesso valore di assorbanza solare, a Ovest si raggiungono le 866 ore, contro le 821 ore della lana minerale; a Est 721 ore vs 828 ore .

Per  $\alpha=0,6$  invece, il  $\Delta T \geq 9^\circ C$  non si supera a Nord, mentre invece si registrano valori simili per le altre esposizioni: 303 ore a Sud; 247 ore a Ovest e 279 a Est (Vedi Figura 1). 276 ore a Sud; 223 ore a Ovest e 263 a Est per la MW

5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

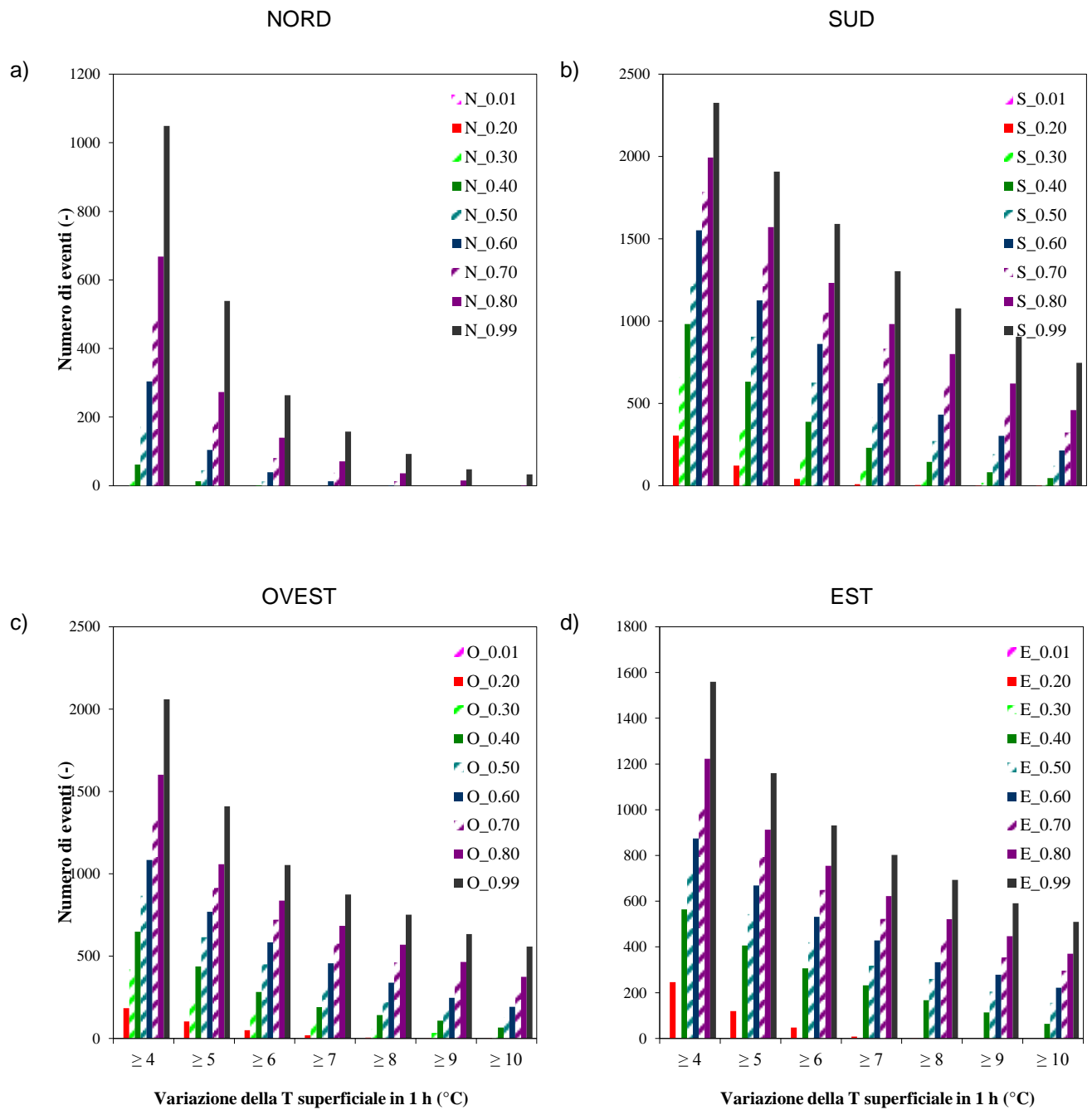


Figura 30 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

*5.3.2.2 Ananlisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia*

Tabella 50 : Milano\_ ΔT&Pioggia\_Nord EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT & Pioggia								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
≥ 4	0	0	0	3	12	20	24	26	35
≥ 5	0	0	0	1	2	11	20	22	27
≥ 6	0	0	0	0	1	3	10	16	23
≥ 7	0	0	0	0	0	1	4	10	19
≥ 8	0	0	0	0	0	0	1	4	12
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	1	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	0	4

Tabella 51 : Milano\_ ΔT&Pioggia\_Sud EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT & Pioggia								
	S_0.01*	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
≥ 4	0	0	0	4	10	22	28	31	43
≥ 5	0	0	0	0	5	9	19	24	32
≥ 6	0	0	0	0	1	5	8	16	29
≥ 7	0	0	0	0	0	3	5	6	20
≥ 8	0	0	0	0	0	0	4	5	13
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	5	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	5

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 52 : Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia\_Ovest EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ & Pioggia								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
$\geq 4$	0	1	3	7	13	17	25	35	46
$\geq 5$	0	1	3	4	8	11	17	20	31
$\geq 6$	0	0	1	3	5	8	11	16	23
$\geq 7$	0	0	1	2	3	5	8	10	18
$\geq 8$	0	0	0	1	2	5	5	8	14
$\geq 9$	0	0	0	1	2	2	5	5	9
$\geq 10$	0	0	0	0	1	2	3	4	9

Tabella 53 : Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia\_Est EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ & Pioggia								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	4	11	17	27	39	49
$\geq 5$	0	0	0	0	3	9	17	23	38
$\geq 6$	0	0	0	0	0	3	9	15	28
$\geq 7$	0	0	0	0	0	1	4	7	20
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	2	4	13
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	3	7
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	1	5

Le ore nell'arco di un intero anno che superano i limiti sono molto inferiori rispetto alla sola variazione di temperatura superficiale. Infatti questi valori rientrano nel caso più generale e sono stati tolti dal paniere totale. I risultati sono molto simili per le varie esposizioni; a Nord, come a Sud e Ovest per valori di  $\alpha=0,5$  e  $\alpha=0,6$  si contano 10 e 20 ore di superamento di  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$ . A Ovest la situazione cambia di poco con 10 e 17 ore. Una situazione quasi identica per la stratigrafia con la lana di roccia. Lo step  $\Delta T \geq 5^\circ\text{C}$  si supera dell'ordine delle 20 ore solo per le assorbanze più alte come  $\alpha=0,7$ . Per i limiti più alti invece vengono registrati valori solo per  $\alpha=0,8$  a Sud, Est e Ovest (Vedi Figura 2).

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

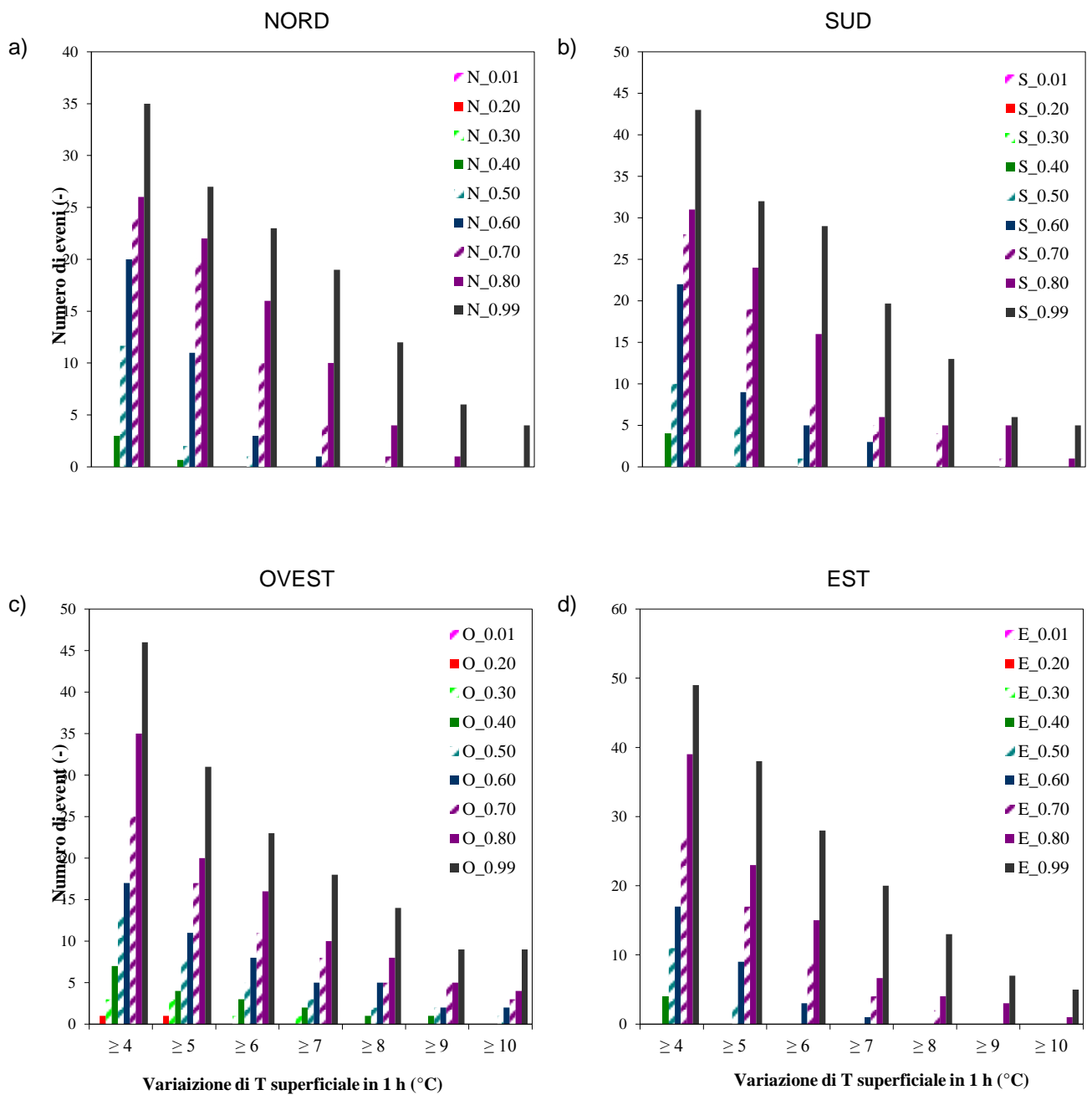


Figura 31 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C quando sta piovendo



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### 5.3.2.3 Ananlisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia nella stagione estiva

Tabella 54 : Milano\_ ΔT&Pioggia&Estate\_Nord EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Estate								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
≥ 4	0	0	0	2	7	13	14	16	23
≥ 5	0	0	0	0	1	8	13	14	16
≥ 6	0	0	0	0	0	1	7	9	14
≥ 7	0	0	0	0	0	0	2	7	11
≥ 8	0	0	0	0	0	0	0	2	9
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	0	3
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Tabella 55 : Milano\_ ΔT&Pioggia&Estate\_Sud EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Estate								
	S_0.01*	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
≥ 4	0	0	0	3	9	18	22	25	31
≥ 5	0	0	0	0	4	8	15	19	26
≥ 6	0	0	0	0	1	4	7	14	23
≥ 7	0	0	0	0	0	2	4	5	17
≥ 8	0	0	0	0	0	0	3	4	11
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	4	5
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	4

Tabella 56 : Milano\_ ΔT&Pioggia&Estate\_Ovest EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Estate								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
≥ 4	0	0	2	6	11	14	18	24	30
≥ 5	0	0	2	3	7	10	14	15	21
≥ 6	0	0	0	2	4	7	10	14	17
≥ 7	0	0	0	1	2	4	7	9	15
≥ 8	0	0	0	0	1	4	4	7	13
≥ 9	0	0	0	0	1	1	4	4	8
≥ 10	0	0	0	0	0	1	2	3	8

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 57 : Milano\_  $\Delta T$ &PioGGia&Estate\_Est EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &PioGGia&Estate								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	3	7	11	19	26	31
$\geq 5$	0	0	0	0	3	7	11	16	26
$\geq 6$	0	0	0	0	0	3	7	10	19
$\geq 7$	0	0	0	0	0	1	3	5	15
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	2	3	11
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	3	5
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	1	4

Valori significativi si ottengono solo fino al limite  $\Delta T \geq 6^\circ\text{C}$  e per i coefficienti di assorbimento solare fino a 0,8. per i valori al di sotto di 0,4 non sono registrati eventi, come per la lana minerale. Per l'esposizione a Sud con coefficiente  $\alpha=0,7$  per  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$  sono state registrate 22 ore contro le 26 ore della MW; 14 a Nord per entrambi i sistemi;a Ovest 18 ore vs 16 e le 19 fatte segnare ad Est; 19 ore per la MW.

5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

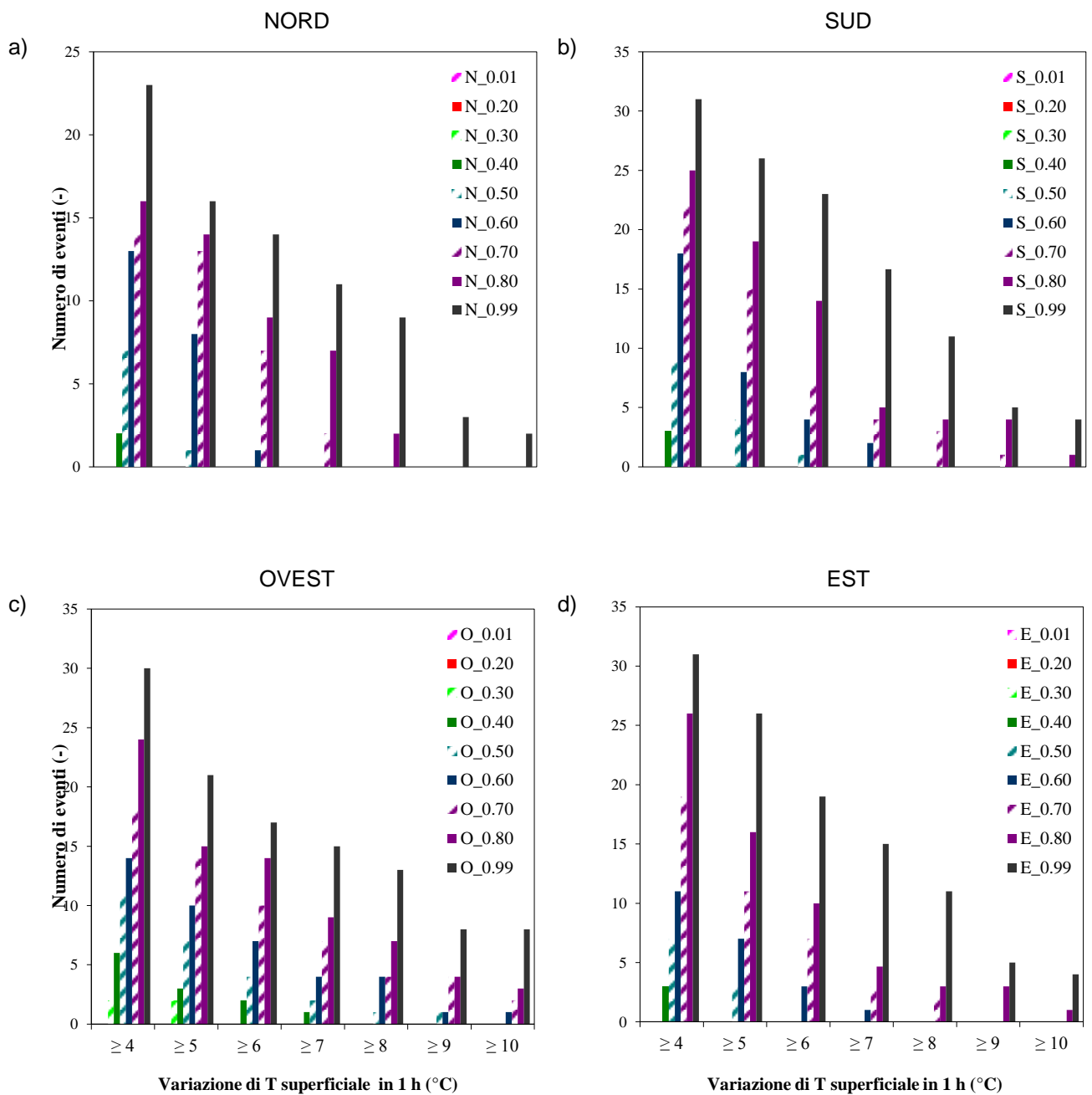


Figura 32 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, durante il periodo estivo.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

*5.3.2.4 Ananalisi della frequenza e intensità degli shock termici influenzati dalla pioggia e dalle alte temperature superficiali*

Tabella 58 : Milano\_ ΔT&Pioggia&Alte temperature\_Nord EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	N_0.01*	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99*
≥ 4	0	0	0	0	0	0	0	2	5
≥ 5	0	0	0	0	0	0	0	2	5
≥ 6	0	0	0	0	0	0	0	1	5
≥ 7	0	0	0	0	0	0	0	1	4
≥ 8	0	0	0	0	0	0	0	1	3
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	0	2
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Tabella 59 : Milano\_ ΔT&Pioggia&Alte temperature\_Sud EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	S_0.01*	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
≥ 4	0	0	0	0	0	0	0	0	8
≥ 5	0	0	0	0	0	0	0	0	8
≥ 6	0	0	0	0	0	0	0	0	8
≥ 7	0	0	0	0	0	0	0	0	7
≥ 8	0	0	0	0	0	0	0	0	4
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	0	2
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Tabella 60 : Milano\_ ΔT&Pioggia&Alte temperature\_Ovest EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
≥ 4	0	0	0	0	0	0	2	3	10
≥ 5	0	0	0	0	0	0	2	3	10
≥ 6	0	0	0	0	0	0	2	3	8
≥ 7	0	0	0	0	0	0	2	3	8
≥ 8	0	0	0	0	0	0	2	3	8
≥ 9	0	0	0	0	0	0	2	3	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	2	6

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 61 : Milano\_  $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature\_Est EPS

h/anno Limiti	Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Tsup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	1	1	5
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	1	1	4
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	1	1	4
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	1	1	3
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	1	1	3
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	1	3
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	1	3

A Sud non si registrano valori, se non per il coefficiente di assorbimento solare  $\alpha=0,99$ . A Nord invece si registrano alcune ore per  $\alpha=0,8$  fino a  $\Delta T \geq 8^\circ\text{C}$ . Situazione identica per la lana minerale.

Per Ovest invece si contano 2 e 3 ore rispettivamente per  $\alpha=0,7$  e  $\alpha=0,8$  per i limiti prefissati, mentre invece per Est si arriva ad avere una sola ora per i diversi limiti. I limiti con i  $\Delta T$  più alti non mostrano eventi per nessuna esposizione e coefficiente di assorbimento. Questo valore è fortemente dipendente dalla collocazione geografica del sito in cui si trova l'edificio (vedi Figura 4).

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

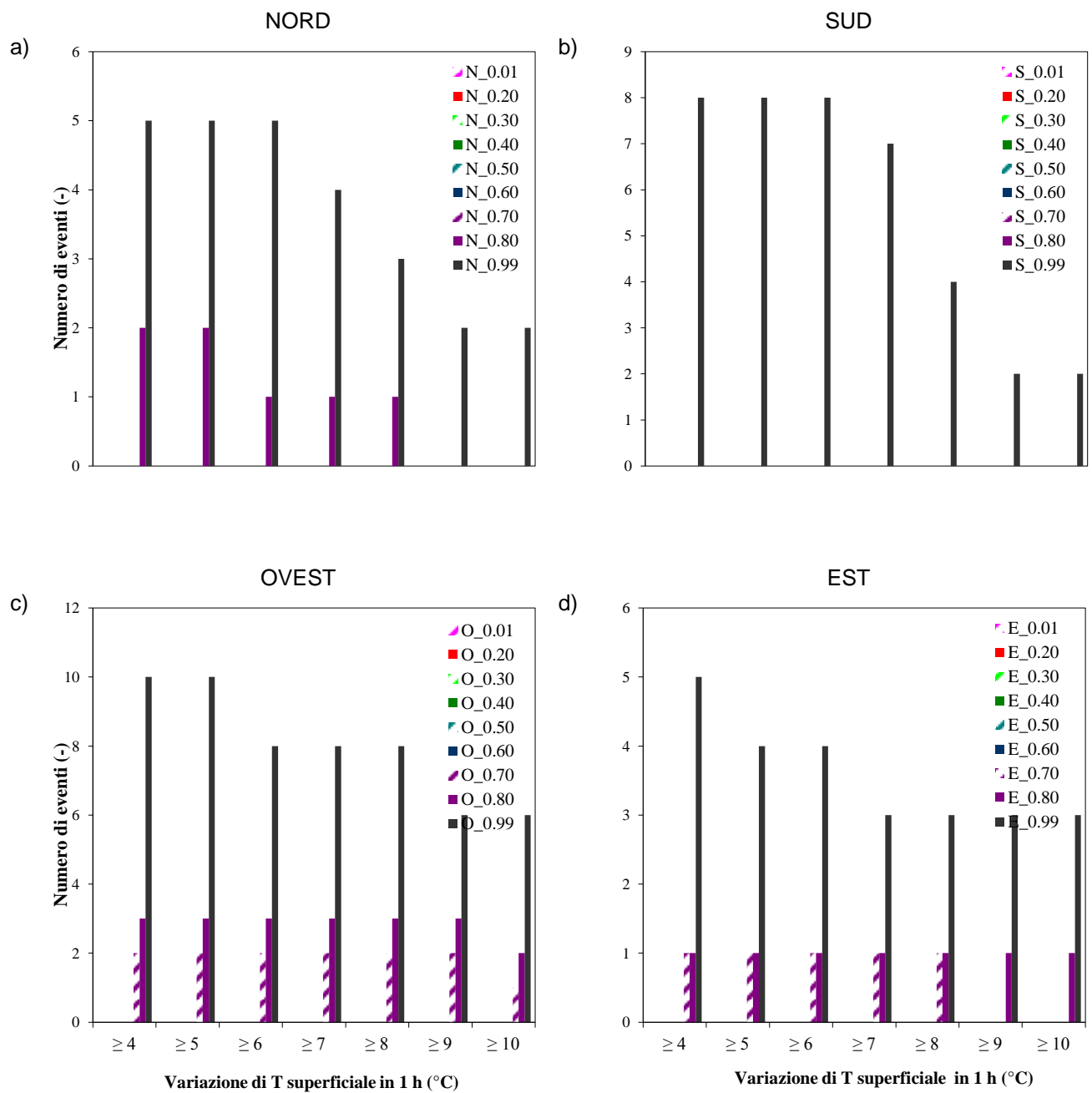


Figura 33 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, quando la Temperatura Superficiale è  $\geq 40^\circ\text{C}$

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### 5.3.2.5 Ananlisi della frequenza e intensità degli shock termici suddivisi per classi di temperature

Tabella 62 : Milano\_ΔT Classi di temperature\_Nord EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT Classi di Temperature								
	N_0.01 *	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99 *
≤ -5	20	20	20	20	20	20	20	19	19
-5 - 0	598	565	558	552	541	533	530	526	520
0 - 5	1595	1547	1504	1464	1435	1408	1382	1356	1329
5 - 10	1619	1530	1512	1496	1464	1457	1442	1432	1377
10 - 15	1614	1523	1477	1450	1439	1388	1354	1334	1304
15 - 20	1572	1477	1446	1414	1371	1331	1302	1285	1251
20 - 25	1280	1265	1240	1212	1158	1140	1109	1054	1002
25 - 30	442	676	708	722	731	740	733	739	679
30 - 35	20	158	285	374	476	508	522	509	540
35 - 40	0	0	10	57	124	218	300	386	431
40 - 45	0	0	0	0	2	18	66	112	233
45 - 50	0	0	0	0	0	0	0	9	70
50 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	5
55 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 - 70	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 63 : Milano\_ΔT Classi di temperature\_Sud EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT Classi di temperature								
	S_0.01 *	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99*
≤ -5	20	20	19	19	18	18	18	18	18
-5 - 0	571	525	511	501	493	482	477	474	468
0 - 5	1588	1442	1407	1374	1347	1332	1311	1290	1260
5 - 10	1642	1473	1421	1395	1367	1333	1314	1308	1279
10 - 15	1622	1480	1411	1335	1298	1263	1239	1215	1194
15 - 20	1568	1488	1421	1361	1316	1280	1223	1187	1127
20 - 25	1261	1260	1199	1130	1044	1007	963	951	903
25 - 30	467	712	709	728	702	661	636	565	531
30 - 35	22	320	459	472	475	462	473	457	417
35 - 40	0	41	185	312	371	362	358	371	348
40 - 45	0	0	20	117	243	315	297	291	298
45 - 50	0	0	0	16	68	174	253	267	244
50 - 55	0	0	0	0	19	52	135	195	213
55 - 60	0	0	0	0	0	17	43	107	206
60 - 65	0	0	0	0	0	2	16	44	130
65 - 70	0	0	0	0	0	0	4	16	69

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 64 : Milano\_ΔT Classi di temperature\_Ovest EPS

h/anno Limiti	Milano_Classi di Temperatura								
	O_0.01*	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99*
≤ -5	20	20	20	20	20	20	19	19	19
-5 - 0	582	550	541	532	522	515	511	509	498
0 - 5	1602	1515	1469	1435	1406	1386	1368	1343	1310
5 - 10	1617	1507	1472	1451	1416	1390	1367	1358	1318
10 - 15	1628	1505	1456	1410	1385	1345	1306	1286	1251
15 - 20	1560	1449	1400	1364	1330	1290	1259	1224	1181
20 - 25	1269	1193	1163	1107	1045	1025	1027	984	945
25 - 30	459	632	624	642	649	635	600	603	575
30 - 35	24	299	342	375	411	445	418	423	410
35 - 40	0	86	206	217	224	263	323	337	346
40 - 45	0	5	60	147	189	155	167	195	262
45 - 50	0	0	7	52	107	144	148	133	155
50 - 55	0	0	0	6	47	95	116	132	121
55 - 60	0	0	0	2	6	45	82	92	106
60 - 65	0	0	0	0	2	5	42	75	95
65 - 70	0	0	0	0	0	2	5	39	65

Tabella 65 : Milano\_ΔT Classi di temperature\_Est EPS

h/anno Limiti	Milano_ΔT Classi di Temperature								
	E_0.01*	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99*
≤ -5	21	21	21	21	21	20	19	19	19
-5 - 0	586	538	586	519	513	509	504	500	497
0 - 5	1594	1493	1594	1399	1369	1345	1325	1294	1264
5 - 10	1629	1510	1629	1447	1418	1401	1380	1375	1334
10 - 15	1607	1483	1607	1406	1352	1314	1263	1242	1206
15 - 20	1581	1411	1581	1320	1302	1264	1259	1220	1169
20 - 25	1256	1260	1256	1133	1060	1025	987	954	922
25 - 30	466	773	466	703	693	688	672	637	579
30 - 35	21	267	21	510	527	484	471	487	486
35 - 40	0	5	0	234	297	355	384	386	378
40 - 45	0	0	0	63	146	176	202	244	306
45 - 50	0	0	0	6	53	119	129	152	177
50 - 55	0	0	0	0	9	51	104	102	123
55 - 60	0	0	0	0	1	8	48	85	93
60 - 65	0	0	0	0	0	2	10	47	85
65 - 70	0	0	0	0	0	0	2	12	64



### *5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI*

Si evidenzia una distribuzione omogenea delle classi; i valori aumentano sempre più fino a stabilizzarsi per le temperature comprese tra 20°C e i 30°C, che rappresentano la situazione più ricorrente. Solo pochi dati sono misurati invece per le classi più alte, tra i 50°C e i 70°C, misurati solo per i coefficienti di assorbimento solare  $> 0,7$ . Per l'intervallo 20°C – 25°C con  $\alpha=0,5$  la frequenza delle ore è più o meno la stessa: a Nord si registrano 1045 ore, contro le 1175 ore della lana minerale; a Sud 1044, contro le 1061; a Ovest 1045 rispetto alle 1063 ore della MW e a Est 1060 vs 1070.

Per l'intorno 40°C-45°C e con  $\alpha=0,6$  invece la situazione è differente: a Nord si misurano 18 ore vs 15 ore con MW, come era ipotizzabile; mentre a Sud 315 vs 309. Per Ovest ed Est i valori sono sullo stesso livello: rispettivamente 155 e 176 contro 154 e 183 ore della lana minerale (vedi Figura 5).

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

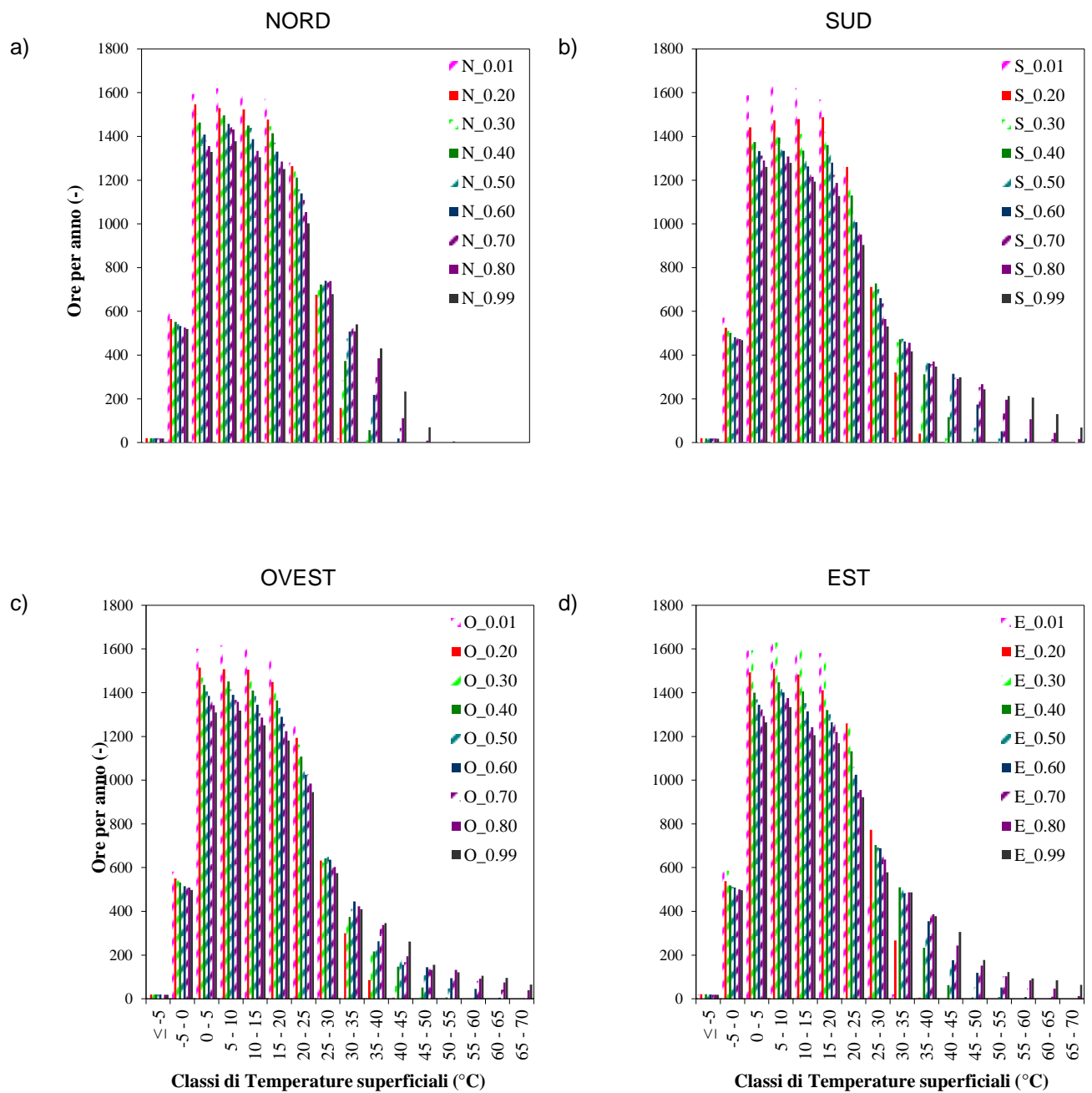


Figura 34 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS è compresa nelle classi di temperature di 5°C, per le varie esposizioni e assorbanze solari

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### 5.3.3 Analisi contenuto d'acqua

L'accumulo d'acqua all'interno dei materiali, insieme alle forti oscillazioni di temperatura superficiale, può spiegare i danni sugli strati esterni. La variazione di umidità relativa nell'arco di un'intera giornata può provocare l'accumulo di umidità all'interno degli strati più esterni, così come la pioggia battente, portata dal vento, bagna il primo strato superficiale, per poi trasmetterla per capillarità a quelli adiacenti. Per questo motivo presentiamo un'analisi dei contenuti d'acqua nei vari strati del sistema ETICS preso in esame nella precedente analisi parametrica, durante un periodo di un anno intero, per un totale di 8760 ore. Gli strati considerati sono l'intonaco di rivestimento STOSILCO con uno spessore di 0,002 m, quello di base STO LEVELL UNI sp. 0,005 m e i due strati a doppia densità della lana minerale rispettivamente sp. 0,018 m e 0,082 m. L'intonaco che si trova a contatto con gli agenti atmosferici esterni, ed essendo un materiale poroso, assorbirà grandi quantitativi d'acqua, mentre invece la lana minerale che si trova all'interno e presenta bassissimi valori di assorbimento capillare, ne accumulerà molto meno.

La città presa in esame è Milano per le esposizioni Nord e Sud e i coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,3$  e  $\alpha=0,7$ . Il lato a Nord è particolarmente sfavorito perchè la pioggia portata dal vento batte su quel lato. Sono stati impostati 5 range di contenuto d'acqua per singolo strato ed è stata calcolata la frequenza con cui questi capitano.

Somma irraggiamento	[kWh/m <sup>2</sup> a]	Somma pioggia verticale	950 [mm/a]
---------------------	------------------------	-------------------------	------------

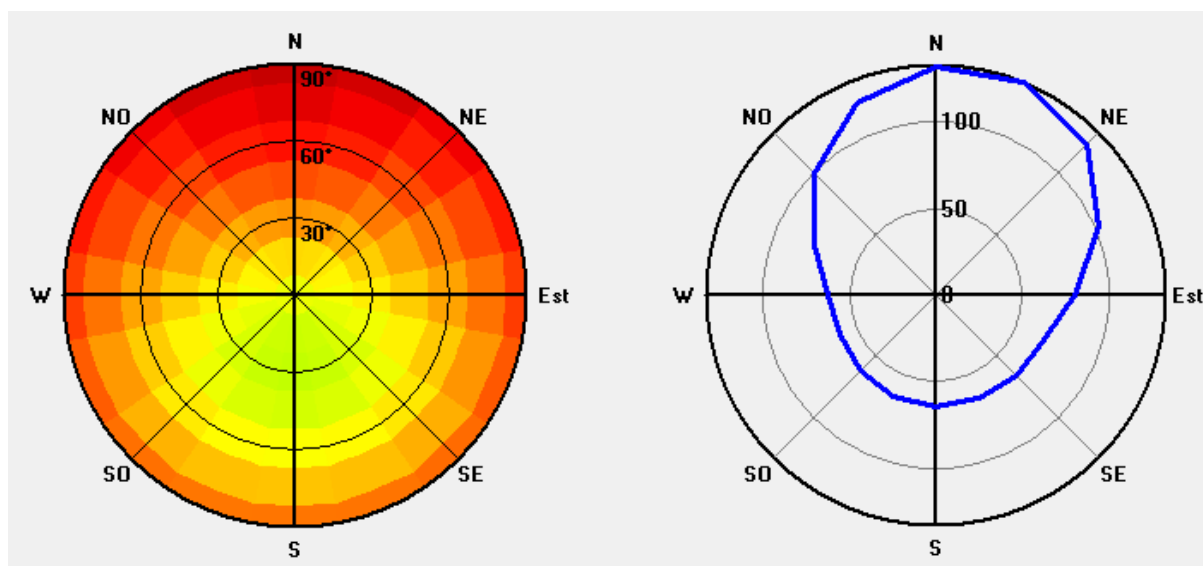


Figura 35: Somma irraggiamento e pioggia verticale a Milano. WUFI dati METEONORM

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 66: Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per lo strato superficiale di intonaco STO SILCO sp. 0,002 m per l'esposizione Nord e Sud.

STO SILCO_0,002 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-50	4799	5781	6709	7748
50-100	2470	2131	1737	854
100-150	1242	754	314	158
150-200	242	94	0	0
200-250	6	0	0	0

Come si vede in Figura 8, Nord è il lato in cui c'è pioggia battente a Milano. Così per questa esposizione si registra il maggior numero di ore in cui il quantitativo d'acqua è molto alto. Infatti per  $\alpha=0,3$  a Nord si registrano 4880 ore in cui c'è un accumulo d'acqua compreso nei 50 kg/m<sup>3</sup> e a Sud 6709, mentre per i quantitativi superiori come i 200 kg/m<sup>3</sup> a Nord ben 242 ore, mentre a Sud nessuna.

A Nord, cambiando il coefficiente di assorbimento solare, i valori cambiano. Assumendo  $\alpha=0,3$  si contano 1242 ore di contenuto d'acqua compreso tra i 100 e i 150 kg/m<sup>3</sup>, mentre per  $\alpha=0,7$  circa la metà, 754 ore. Questo dovuto al fatto che un coefficiente di assorbimento solare più alto permette una più rapida evaporazione dell'acqua accumulata nello strato.

Tabella 67: Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per lo strato superficiale di intonaco STO LEVELL UNI sp. 0,005 m per l'esposizione Nord e Sud.

STO LEVELL UNI_0,005 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-50	4793	5874	6556	7832
50-100	2441	2185	2015	655
100-150	1216	701	189	223
150-200	311	0	0	50
200-250	0	0	0	0

I valori per l'intonaco di base STO LEVELL UNI sono molto simili a quelli dello strato di finitura. Lo strato è protetto da quello precedente ma è leggermente più spesso. Così quando il primo strato va a saturazione, l'acqua viene immediatamente trasmessa al secondo, contando anche su un alto valore di assorbimento capillare. In ogni caso si nota come per Nord  $\alpha=0,7$  ci siano 0 ore in cui si accumulino più di 150 kg/m<sup>3</sup> d'acqua, mentre sullo strato più esterno capita 94 volte.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Tabella 68: Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per l'isolante in lana minerale ad alta densità sp. 0,018 m ρ=155 kg/m<sup>3</sup> per l'esposizione Nord e Sud

LANA MINERALE HD_0,018 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-20	8152	8715	8760	8760
20-50	608	45	0	0
50-75	0	0	0	0
75-100	0	0	0	0

Come volevasi dimostrare, per la lana minerale vale il discorso fatto più volte all'interno di questo studio. L'acqua che si accumula è quasi sempre pochissima per via della sua struttura fibrosa che ostacola l'assorbimento capillare e superficiale. Così quella accumulata dall'intonaco esterno non viene trasmessa, se non in piccola parte. A parte a Nord per α=0,3, la condizione più sfavorevole, in cui capita che per 608 volte l'acqua accumulata sia entro i 50kg/m<sup>3</sup>, per tutti gli altri casi, non supera mai i 20 kg/m<sup>3</sup> per tutte le esposizioni e coefficienti di assorbimento solare.

Tabella 69: Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per l'isolante in lana minerale a bassa densità sp. 0,082 m ρ=80 kg/m<sup>3</sup> per l'esposizione Nord e Sud

LANA MINERALE LD_0,032 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-20	8760	8760	8760	8760
20-50	0	0	0	0
50-75	0	0	0	0
75-100	0	0	0	0

Stesso discorso fatto per l'alta densità, vale per la bassa densità [80kg/m<sup>3</sup>]. Tutti i valori rientrano nel primo limite di contenuto d'acqua.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

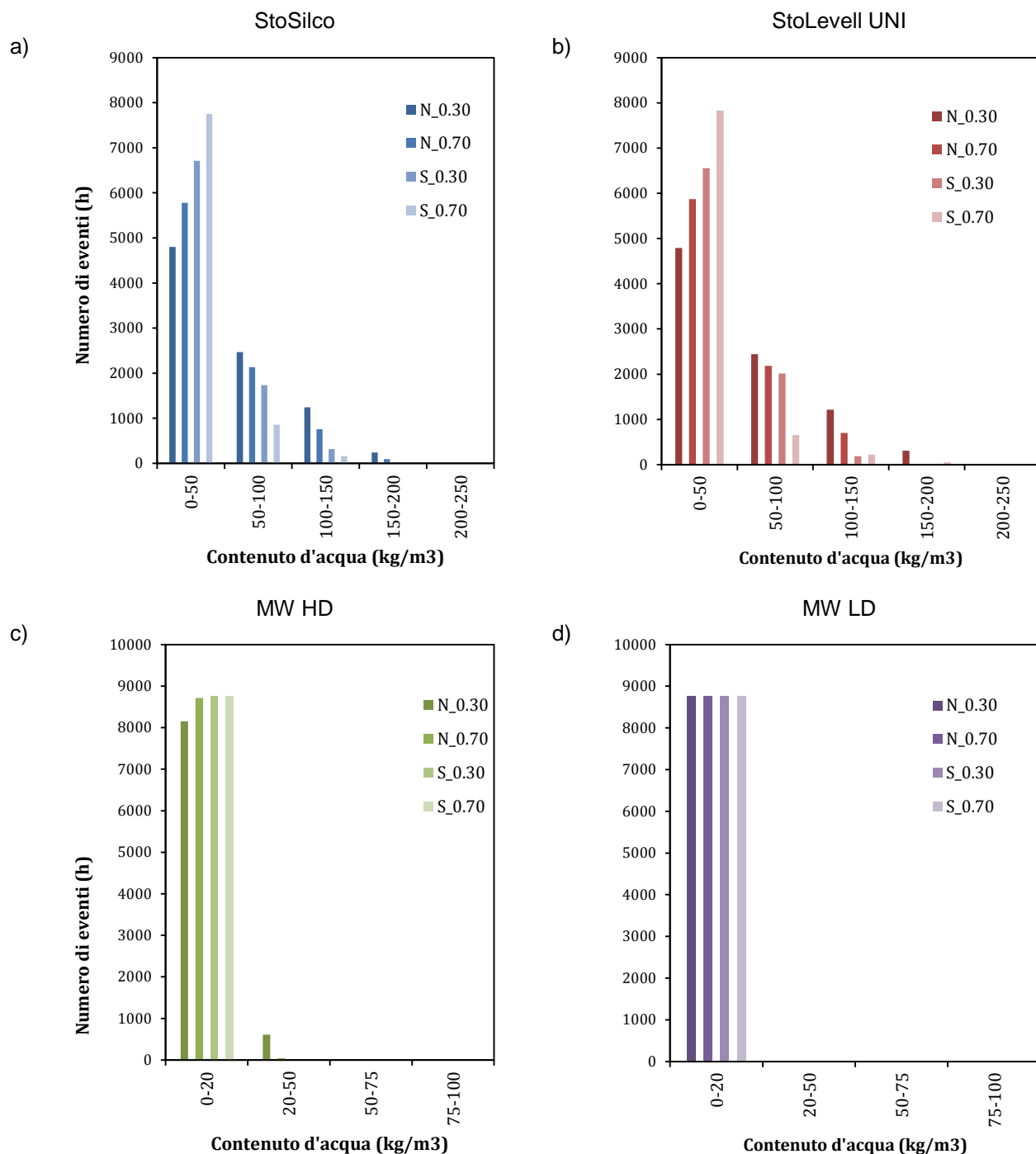


Figura 36: Numero di eventi orari in cui il contenuto d'acqua ricade in un determinato step di contenuto d'acqua.

Per i vari materiali che compongono l'ETICS, a e b presentano valori molto simili tra loro. Solo in a si registrano contenuti d'acqua per l'ultimo range. In d tutti i casi rientrano nel primo step con quantitativi d'acqua inferiori ai 20 kg/m<sup>3</sup>; per c si registrano eventi in cui ci siano più di 20 kg/m<sup>3</sup> d'acqua.

### 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Anche per l'ETICS con l'EPS (sp. 10 cm) è stata fatta un analisi sul contenuto d'acqua.

Tabella 70 : Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per lo strato superficiale di intonaco STO SILCO sp. 0,002 m per l'esposizione Nord e Sud.

STO SILCO_0,002 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-50	5197	6212	7152	7871
50-100	2540	1874	1335	760
100-150	902	627	274	129
150-200	122	48	0	0
200-250	0	0	0	0

Tabella 71 : Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per lo strato superficiale di intonaco STO LEVELL UNI sp. 0,005 m per l'esposizione Nord e Sud.

STO LEVELL UNI_0,005 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-50	5801	6680	8760	8760
50-100	2960	2080	0	0
100-150	0	0	0	0
150-200	0	0	0	0
200-250	0	0	0	0

Tabella 72 . Numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] per l'isolante in EPS sp. 0,1 m ρ=80 kg/m<sup>3</sup> per l'esposizione Nord e Sud

EPS_0,1 m				
kg/m <sup>3</sup>	N_0.30	N_0.70	S_0.30	S_0.70
	h	h	h	h
0-20	8760	8760	8760	8760
20-50	0	0	0	0
50-75	0	0	0	0
75-100	0	0	0	0

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

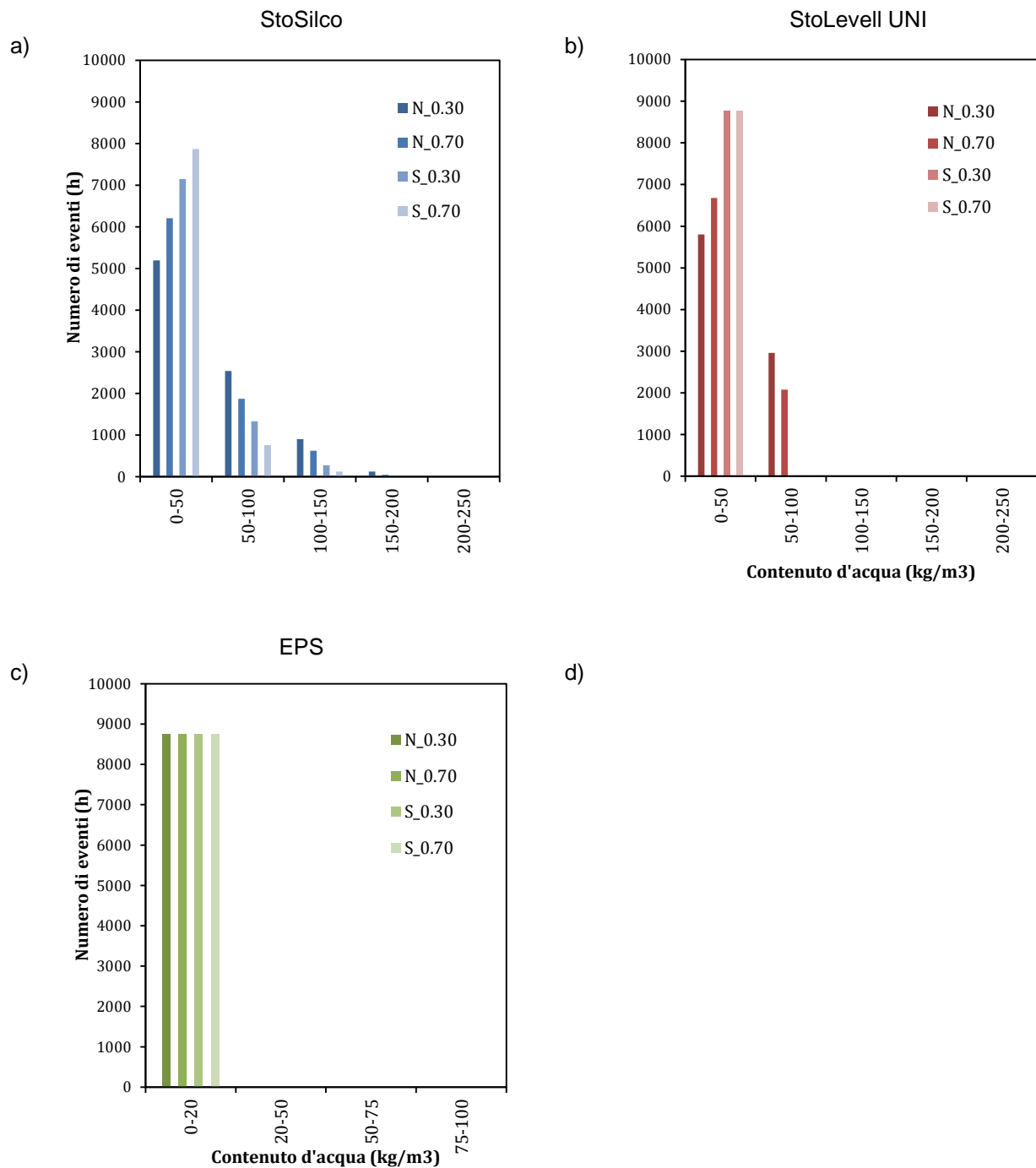


Figura 37 : Numero di eventi orari in cui il contenuto d'acqua ricade in un determinato step di contenuto d'acqua.



## 5.4 Valutazione critica dei risultati ottenuti : confronto tra ETICS in lana minerale e EPS

### 5.4.1 Confronto della frequenza e intensità degli shock termici

- NORD

Tabella 73 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Nord

h/anno Limiti	Milano_ΔT			
	EPS_N_0.20	MW_N_0.20	EPS_N_0.80	MW_N_0.80
≥ 4	0	0	668	614
≥ 5	0	0	273	241
≥ 6	0	0	140	122
≥ 7	0	0	71	59
≥ 8	0	0	36	30
≥ 9	0	0	15	9
≥ 10	0	0	1	1

h/anno Limiti	Palermo_ΔT			
	EPS_N_0.20	MW_N_0.20	EPS_N_0.80	MW_N_0.80
≥ 4	0	0	363	329
≥ 5	0	0	182	161
≥ 6	0	0	87	69
≥ 7	0	0	31	27
≥ 8	0	0	6	4
≥ 9	0	0	3	1
≥ 10	0	0	1	1

h/anno Limiti	Roma_ΔT			
	EPS_N_0.20	MW_N_0.20	EPS_N_0.80	MW_N_0.80
≥ 4	0	0	782	690
≥ 5	0	0	325	287
≥ 6	0	0	141	121
≥ 7	0	0	63	55
≥ 8	0	0	30	24
≥ 9	0	0	10	9
≥ 10	0	0	4	4

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

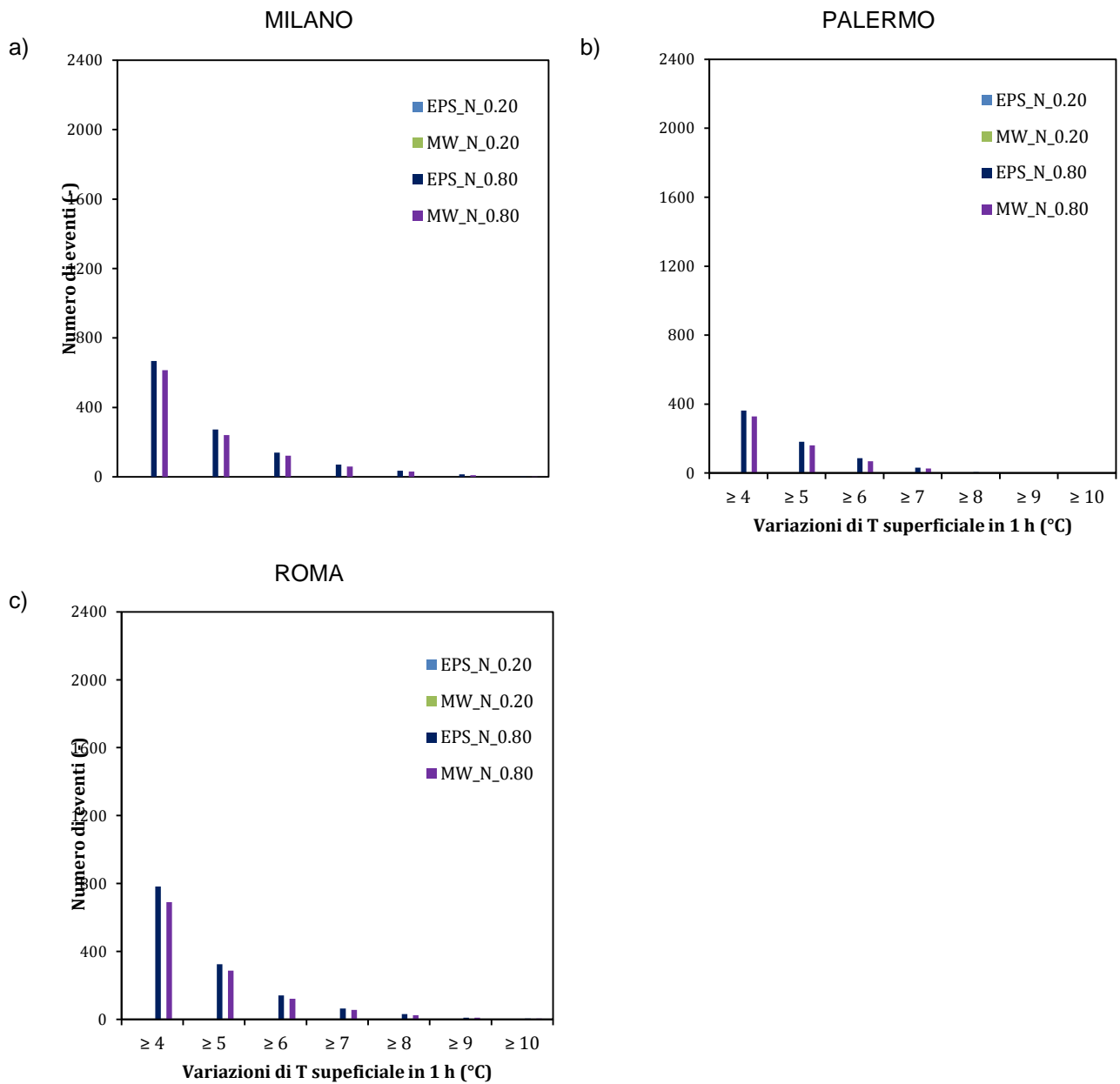


Figura 38 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,2$  e  $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Nord

Non si registrano eventi per l'EPS e la lana minerale per  $\alpha = 0.2$  per le tre città. Per  $\alpha = 0.8$  in generale l'EPS presenta un maggior numero di eventi per tutti i range rispetto alla lana minerale, a Milano per  $\Delta T \geq 4^\circ\text{C}$  si contano 668 ore per l'EPS e 614 per la lana minerale; a Palermo 363 per l'EPS e 329 per la lana minerale; a Roma 782 contro 690.

A Roma e Milano la differenza tra i livelli delle temperature tra l'EPS e la lana minerale è abbastanza significativa mentre a Palermo i valori sono piuttosto simili.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

- SUD

Tabella 74 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Sud

h/anno Limiti	Milano_ΔT			
	EPS_S_0.20	MW_S_0.20	EPS_S_0.80	MW_S_0.80
≥ 4	304	258	1993	1975
≥ 5	122	100	1571	1550
≥ 6	42	29	1231	1195
≥ 7	10	5	982	948
≥ 8	4	2	800	757
≥ 9	1	1	621	579
≥ 10	1	0	459	430

h/anno Limiti	Palermo_ΔT			
	EPS_S_0.20	MW_S_0.20	EPS_S_0.80	MW_S_0.80
≥ 4	138	115	2244	2222
≥ 5	47	36	1820	1772
≥ 6	14	8	1434	1390
≥ 7	0	0	1108	1063
≥ 8	0	0	848	808
≥ 9	0	0	660	614
≥ 10	0	0	483	452

h/anno Limiti	Roma_ΔT			
	EPS_S_0.20	MW_S_0.20	EPS_S_0.80	MW_S_0.80
≥ 4	341	309	2313	2287
≥ 5	133	103	1867	1835
≥ 6	34	27	1497	1459
≥ 7	8	7	1190	1140
≥ 8	4	2	931	890
≥ 9	0	0	728	680
≥ 10	0	0	547	516

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

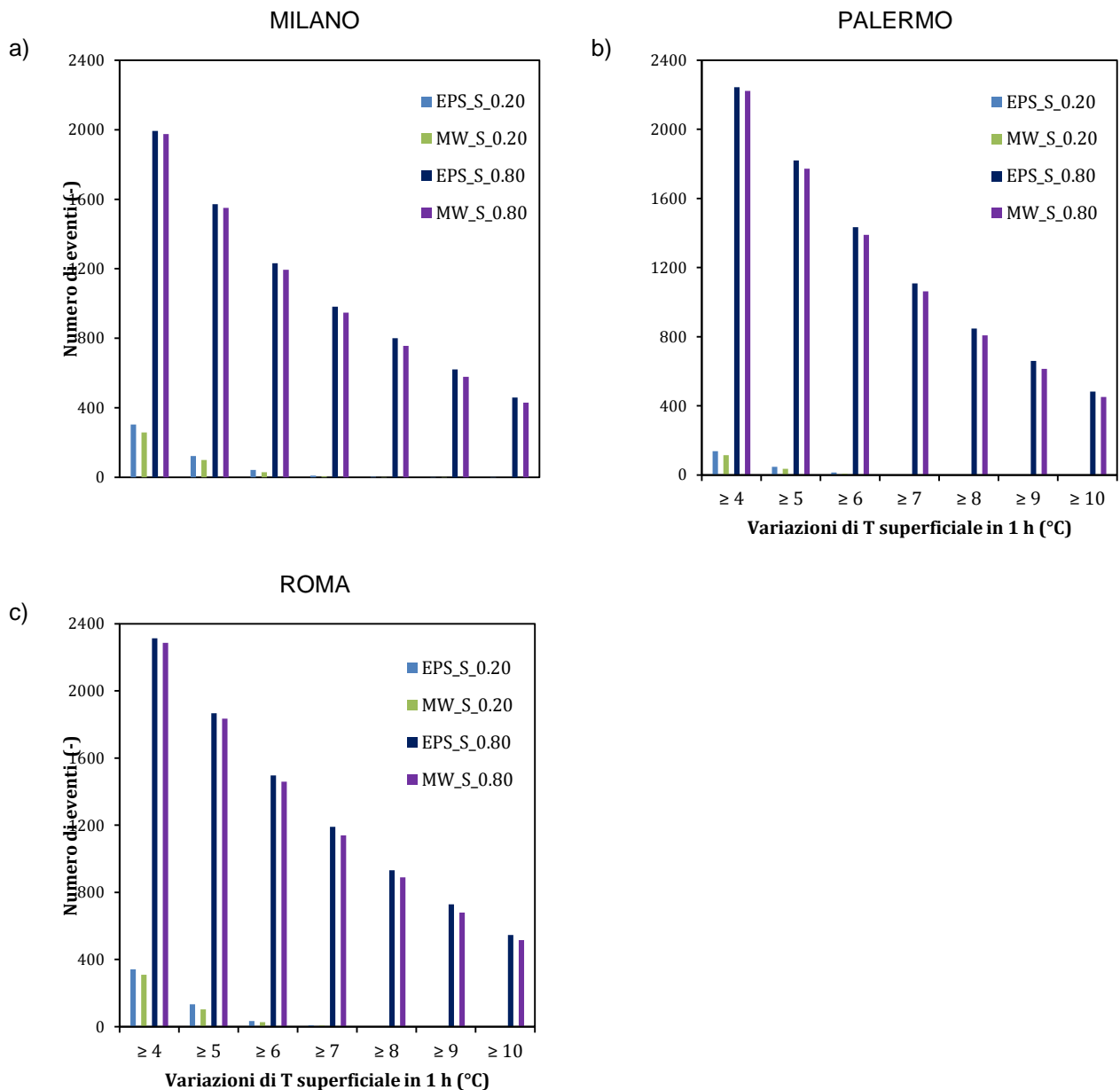


Figura 39 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,2$  e  $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Sud

Roma è la città in cui l'intensità e la frequenza degli shock termici è maggiore. Infatti per  $\Delta T \geq 10$  °C con  $\alpha = 0.8$  per l'EPS si contano 547 ore contro i 516 della lana minerale; a Palermo rispettivamente 483 e 452, così come a Milano 459 e 430.

Per  $\alpha = 0.2$  a Palermo l'escursione termica è molto ridotta, i  $\Delta T \geq 4$  °C si presentano 138 ore per l'EPS e 115 per la lana minerale. A Roma e Milano si superano invece le 300 ore.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

### - OVEST

Tabella 75 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Ovest

h/anno Limiti	Milano_ΔT			
	EPS_O_0.20	MW_O_0.20	EPS_O_0.80	MW_O_0.80
≥ 4	183	170	1602	1536
≥ 5	103	88	1058	1035
≥ 6	50	40	837	808
≥ 7	18	13	684	662
≥ 8	5	4	569	550
≥ 9	2	1	464	442
≥ 10	1	1	374	346

h/anno Limiti	Palermo_ΔT			
	EPS_O_0.20	MW_O_0.20	EPS_O_0.80	MW_O_0.80
≥ 4	187	166	1670	1615
≥ 5	78	63	1286	1253
≥ 6	23	10	1047	1005
≥ 7	1	0	850	817
≥ 8	0	0	702	674
≥ 9	0	0	597	553
≥ 10	0	0	490	463

h/anno Limiti	Roma_ΔT			
	EPS_O_0.20	MW_O_0.20	EPS_O_0.80	MW_O_0.80
≥ 4	224	194	1783	1727
≥ 5	108	92	1202	1173
≥ 6	39	29	940	914
≥ 7	6	3	769	750
≥ 8	1	0	634	611
≥ 9	0	0	532	496
≥ 10	0	0	430	402

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

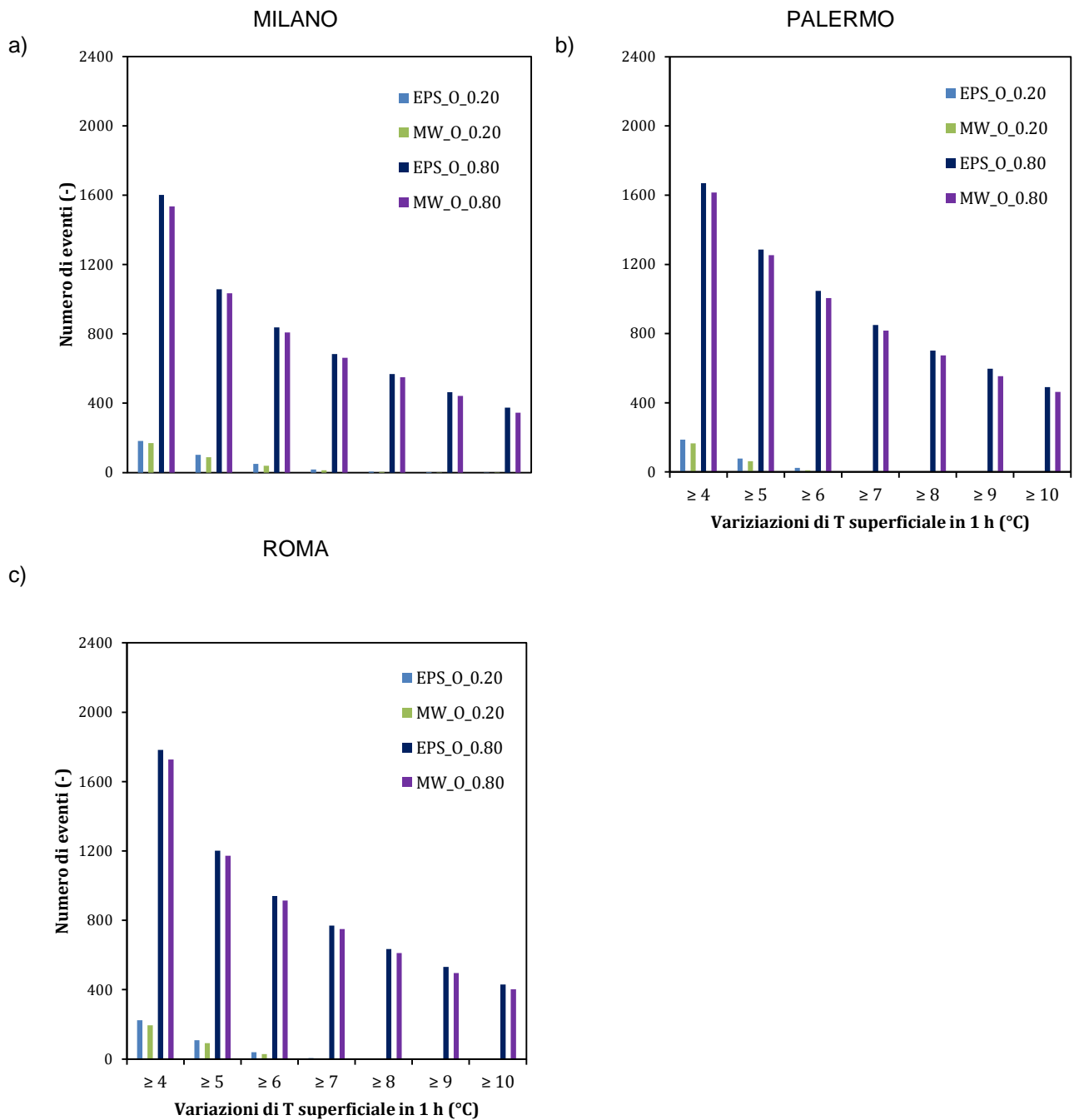


Figura 40 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,2$  e  $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Ovest

Per  $\alpha = 0.2$  solo a Milano si registrano eventi sopra  $\Delta T \geq 8$  °C.

Per  $\alpha = 0.8$  a Roma e Palermo il numero di eventi di tutti i range è superiore a quello di Milano; a Palermo si registrano le frequenze più alte per le intensità maggiori, 490 ore per l'EPS e  $\Delta T \geq 10$  °C contro i 430 di Roma.

Per la frequenza più alta ( $\Delta T \geq 4$  °C e  $\alpha = 0.8$ ) la differenza tra lana minerale e EPS per tutte le città è circa di 60 ore, con Roma che mostra sempre la più alta 1783 contro le 1602 di Milano (EPS).

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

- EST

Tabella 76 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Est

h/anno Limiti	Milano_ΔT			
	EPS_E_0.20	MW_E_0.20	EPS_E_0.80	MW_E_0.80
≥ 4	246	230	1223	1182
≥ 5	119	100	913	891
≥ 6	48	36	755	722
≥ 7	8	7	623	602
≥ 8	1	0	521	502
≥ 9	0	0	447	422
≥ 10	0	0	370	350

h/anno Limiti	Palermo_ΔT			
	EPS_E_0.20	MW_E_0.20	EPS_E_0.80	MW_E_0.80
≥ 4	216	185	1490	1468
≥ 5	76	60	1245	1206
≥ 6	17	8	1024	1000
≥ 7	0	0	874	835
≥ 8	0	0	724	690
≥ 9	0	0	611	582
≥ 10	0	0	520	503

h/anno Limiti	Roma_ΔT			
	EPS_E_0.20	MW_E_0.20	EPS_E_0.80	MW_E_0.80
≥ 4	340	316	1485	1457
≥ 5	159	142	1166	1131
≥ 6	51	35	950	922
≥ 7	16	12	803	776
≥ 8	3	1	674	641
≥ 9	1	0	572	554
≥ 10	0	0	506	486

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

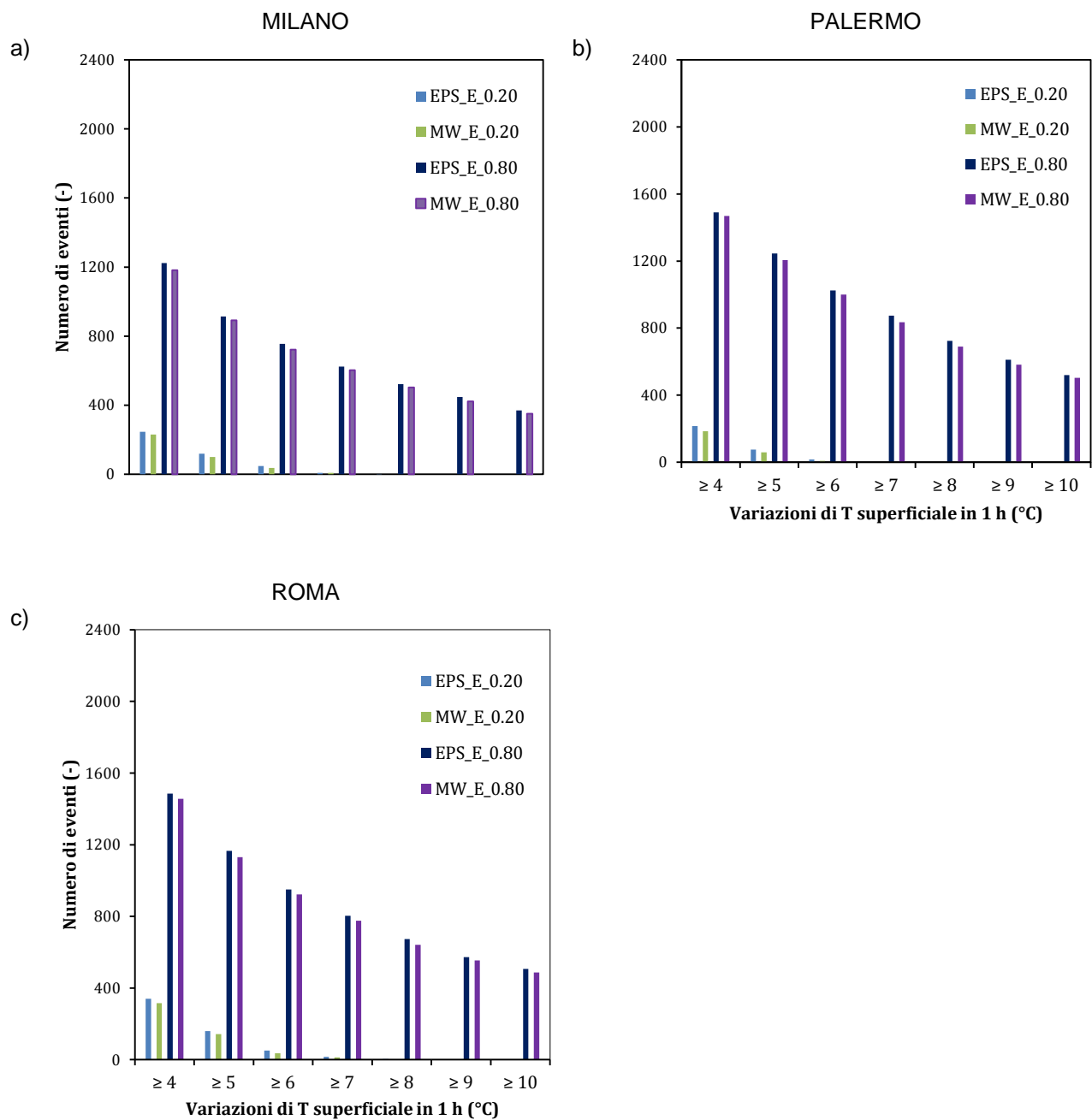


Figura 41 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,2$  e  $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Est

Roma per  $\alpha = 0.2$  ha valori più elevati rispetto a Milano e Palermo che risultano simili.

Palermo per  $\alpha = 0.8$  registra valori leggermente più alti rispetto a Roma ed è l'unico caso in cui si verifica questa condizione.



## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Dai dati precedenti si può notare come le frequenze di shock termici siano sempre maggiori in un ETICS con EPS rispetto a uno con lana minerale a parità di strati di finitura. Questo dato è confermato anche da Künzel [2009] che indica come il livello delle temperature aumenti per via dell'alto coefficiente di resistenza al vapore acqueo dell'EPS ( $\mu = 50$ , per la lana minerale  $\mu = 1$ ) che limita molto la diffusione del vapore.

Roma ha i valori più alti di frequenze per tutti i range analizzati rispetto a Milano e Palermo per via della maggiore escursione termica tra le temperature superficiali minime e massime (es. a Ovest con  $\alpha = 0.8$   $T_{sup\ max} = 81,97^{\circ}C$  e  $T_{sup\ min} = -0,48^{\circ}C$ ); Milano però si avvicina ai valori di Roma per l'esposizione Nord che risulta essere la più sfavorita per l'incidenza della pioggia. Palermo supera i valori di Roma, seppur di poco, per l'esposizione Est che si affaccia sul mare e dove batte la pioggia e il vento. Questi due fattori possono spiegare l'aumento della frequenza degli shock termici.

Questo confronto tra le varie città è utile per capire la diversa intensità delle temperature superficiali a seconda del colore di finitura che si sceglie di utilizzare. Il valore di  $\alpha = 0.2$  corrisponde ad una tonalità molto chiara e rifletterà quindi una maggior quantità di luce abbassando notevolmente la temperatura superficiale rispetto ad una tonalità scura a cui corrisponde il valore di  $\alpha = 0.8$ .

In questo modo se si decide di utilizzare un colore molto scuro dello strato di finitura possiamo valutare gli stress termici che si verificano in base alla città e a tutte le condizioni al contorno presenti e quindi valutare la fattibilità della scelta finale.

I grandi shock termici, come hanno dimostrato Nannen e Gertis [1985] conducendo analisi sugli stress termici all'interno degli isolanti provocati da queste differenze di temperature, non spiegano da soli i guasti che si formano sullo strato di finitura. In nessuno dei casi testati nelle loro prove non è mai stata superata la resistenza a trazione dell'intonaco. Questo perchè le oscillazioni giornaliere di temperatura attraversano i vari strati senza bagnarli, come invece fa l'umidità relativa.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**5.4.2 Confronto contenuti d'acqua negli strati dei due diversi ETICS**

Ci proponiamo di confrontare i contenuti d'acqua misurati precedentemente tra le due diverse stratigrafie, ETICS 1 con Lana Minerale, ETICS 2 con EPS, per sottolinearne le differenze e capirne i motivi.

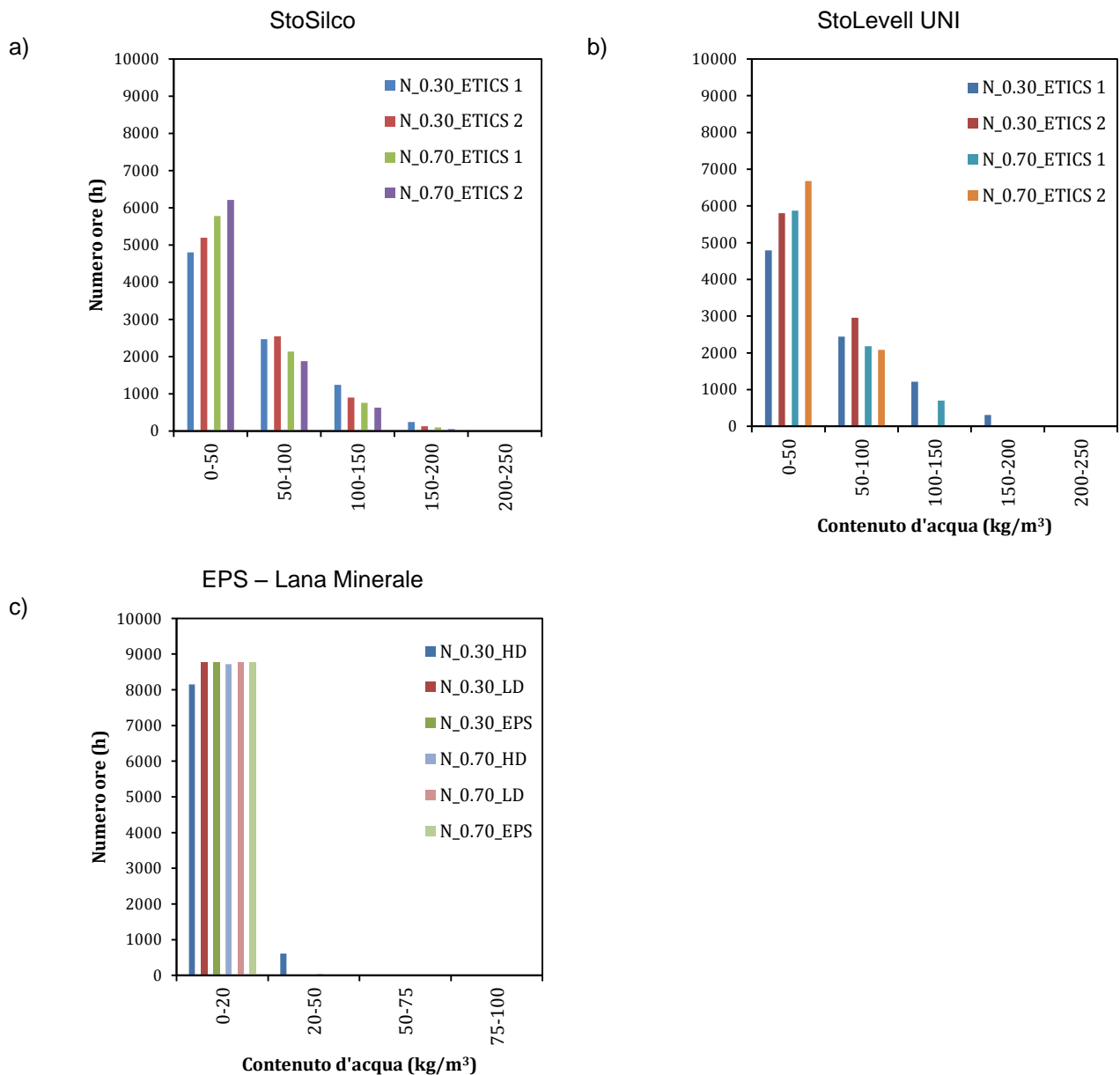


Figura 42 : Confronto contenuti d'acqua per gli strati di intonaco e per lo strato isolante, coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,3$  e  $\alpha = 0,7$ , per l'esposizione Nord, città di Milano

5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

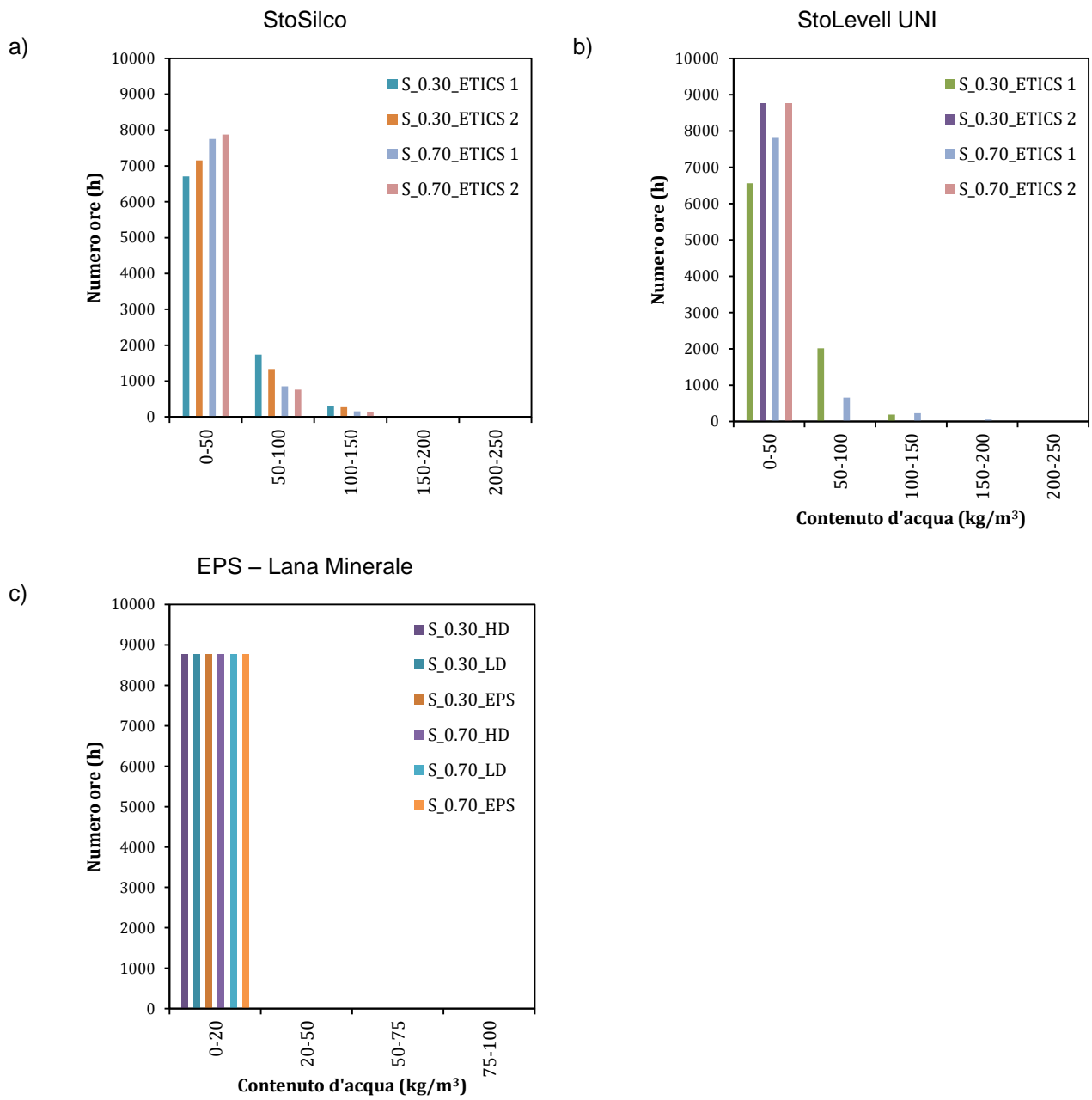


Figura 43 : Confronto contenuti d'acqua per gli strati di intonaco e per lo strato isolante, coefficienti di assorbimento solare  $\alpha=0,3$  e  $\alpha = 0,7$ , per l'esposizione Sud, città di Milano

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Confrontando i singoli strati si nota come si accumuli più acqua nello strato di intonaco di finitura dell'ETICS con l'isolante in Lana Minerale; infatti per l'esposizione Nord e  $\alpha = 0.7$  per 94 ore è presente un contenuto d'acqua compreso tra 150 e 200 kg/m<sup>3</sup> rispetto alle 48 volte per l'ETICS 2, la metà delle volte.

Per lo stesso confronto ma con esposizione Sud i valori dell'ETICS 1 e dell'ETICS 2 sono abbastanza simili : 158 ore per l'ETICS 1 e 129 ore per l'ETICS 2.

A Nord la differenza tra i valori è più marcata perchè a Milano è il lato più esposto alla pioggia battente, quindi la condizione più sfavorevole.

Passando all'intonaco di base dell'ETICS 2 non si registrano mai contenuti d'acqua superiori ai 100 kg/m<sup>3</sup>; per le esposizioni a Sud non si superano nemmeno i 50 kg/m<sup>3</sup>.

Il discorso cambia per l'ETICS 1 dove per esempio per Nord 0.3 il numero di ore in cui si raggiungono i 200 kg/m<sup>3</sup> è maggiore che per l'intonaco di finitura (311 contro 242 ore); anche a Sud 0.7 lo stesso contenuto si registra per 50 volte.

All'interno dello strato di EPS non si superano mai i 2 kg/m<sup>3</sup>, al contrario nello strato di Lana Minerale solo a Nord per l'alta densità si superano i 20 kg/m<sup>3</sup>.

Interpretando i numeri per l'intonaco di finitura con densità 1340 kg/m<sup>3</sup> e spessore 2 mm avere al suo interno per 1242 ore 120 kg<sup>3</sup> di acqua, vuol dire avere per  $\approx 51$  giorni all'anno 0,24 kg d'acqua per un metro quadrato di intonaco che ne pesa 2,68 kg da asciutto. Se raggiungesse la saturazione ne avrebbe 0,7 kg/m<sup>2</sup>. Questo significa che il nostro intonaco di finitura è parecchio umido per lunghi periodi nell'ETICS 1. Per l'ETICS 2 gli stessi contenuti si presentano per periodi più brevi a Nord con  $\alpha = 0.3$ .

Per quanto riguarda l'intonaco di base spessore 5 mm e densità 1200 kg/m<sup>3</sup>, nell'ETICS 1 (Lana Minerale) abbiamo visto esserci, per 1216 ore, un contenuto d'acqua tra i 100 e i 150 kg/m<sup>3</sup>; ovvero per  $\approx 50$  giorni incorporare 0,6 kg d'acqua per un metro quadrato di intonaco che pesa 6 kg asciutto (10 %). Questo valore è molto alto perchè raggiunge la metà del contenuto d'acqua a saturazione.

Nell'ETICS 1 invece non si verifica questa condizione perchè non si superano i 90 kg/m<sup>3</sup>.

In entrambi gli strati isolanti è presente quasi sempre poca acqua come dimostra H.M.Künzel [2009]; nei pannelli di lana minerale con densità 90 kg/m<sup>3</sup> di spessore 10 cm non si superano mai gli 0.5 kg per metro quadrato di pannello, per l'EPS con densità 30 kg/m<sup>3</sup> gli 0.18 kg/m<sup>2</sup> d'acqua.

Il motivo per cui il contenuto d'acqua degli stessi intonaci (StoSilco, StoLevell) cambia a seconda dell'isolante termico su cui vengono applicati dipende principalmente dal differente coefficiente di assorbimento  $A_w$  [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>]. Infatti secondo il rapporto di prova dell'ITC-CNR (Istituto per le Tecnologie della Costruzione) per l'isolante FrontRock Max E, che ha le stesse proprietà fisiche e chimiche dell'isolante scelto, l'assorbimento d'acqua  $W_p$  sulle 24 ore è pari a 0.03 kg/m<sup>2</sup>. Il coefficiente  $A_w$  si ricava quindi secondo la ISO 15148 dividendo l'assorbimento d'acqua  $W_p$  per  $\sqrt{86400}$  (secondi in un giorno). Si ottiene  $A_w = 0.000102$  [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>].

Il coefficiente  $A_w$  dell' EPS con densità 30 kg/m<sup>3</sup> e un assorbimento d'acqua del 2% in volume su 28 giorni di prova è uguale a 0.0000729 [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>], rapportato alle 24 ore. I due coefficienti sono molto bassi ma il valore di  $A_w$  dell'EPS è di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quello della lana minerale.

## 5. Casi di studio : Analisi igrotermiche con software WUFI

Nonostante il contenuto d'acqua superiore, secondo Künzel [2009], la caratteristica principale della lana minerale rispetto agli altri materiali isolanti è l'alta permeabilità al vapore acqueo, con un coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore  $\mu = 1$ , equivalente ad uno strato d'aria. L'EPS invece ha un coefficiente  $\mu = 50$ ; il che significa avere un tempo di essiccazione cinquanta volte superiore alla lana minerale con  $\mu = 1$ , a parità di variazione di massa.

Partendo dalle formule [8], [10] in cui assumiamo che i due materiali abbiano la stessa area  $A$  e  $\Delta p_v$  uguali, possiamo affermare :

$$W = \frac{m_2 - m_1}{\Delta t}$$

secondo la [13] :

$$W = \frac{\delta_{EPS}}{d}$$

con  $d = 10$  cm, con la formula [14] si arriva a :

$$\frac{m_2 - m_1}{\Delta t} = \frac{\delta_{aria}}{d * \mu}$$

Si ricava che :

$$\Delta t = \frac{\mu * d * (m_2 - m_1)}{\delta_{aria}}$$

quindi si nota la proporzionalità diretta tra  $\Delta t$  e il coefficiente  $\mu$ .

Questo può portare sia vantaggi che svantaggi; nel caso di un isolamento esterno la lana minerale permette un rapido rilascio dell'umidità verso l'esterno.

Il contenuto igroscopico dell'umidità (assorbimento dell'umidità) della lana minerale è basso perchè nelle sua struttura a fibre non si formano capillari che possono accumulare quantitativi significativi di vapore acqueo.

Per evitare danneggiamenti da accumulo di umidità, in caso di pioggia battente, la lana minerale viene resa idrofoba.

Considerando l'essiccazione di un substrato con differenti ETICS, Künzel mostra come usando un isolante in materiale espanso rigido, il livello delle temperature aumenta rispetto a una parete monostrato e la diffusione del vapore, importante per l'essiccazione verso l'esterno, è impedita dalla resistenza dell'isolante.

Confrontando un EPS con una muratura, si nota un tempo di essiccazione maggiore, che è invece minore con la lana minerale. A seconda della sensibilità all'umidità della muratura, gli ETICS composti da lana minerale sarebbero quindi preferibili. Sarebbe consigliabile che venissero usati intonaci permeabili per evitare l'accumulo di umidità all'esterno della lana minerale al di sotto dell'intonaco di finitura in caso di pioggia battente.

La struttura aperta della lana minerale, favorevole per le condizioni climatiche dell'Europa Centrale, può essere svantaggiosa per i climi tropicali o caldi e negli edifici climatizzati dove c'è per la maggior parte dell'anno un flusso di vapore dall'esterno all'interno.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Il lato freddo dell'isolante che sotto le condizioni al contorno date si trova sul lato esterno, avendo una resistenza alla diffusione di vapore più alta rispetto alle fibre dell'isolante, potrebbe accumulare umidità.

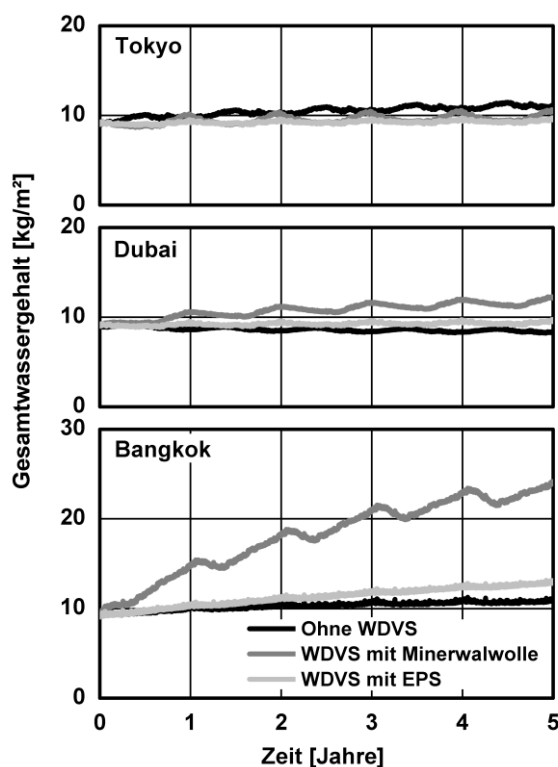


Figura 44 : Calcolo del contenuto totale d'acqua in una muratura senza isolante esterno (curva nera), con ETICS in lana minerale (grigio scuro) e EPS (grigio chiaro) in tre differenti località con climi caldi

In Figura 44 si mostra che questo effetto gioca un ruolo importante nei climi estremi come Dubai o ancora più chiaramente a Bangkok.

Nei climi mediterranei invece, ad esempio le calde e umide estati di Lisbona ( vedi Allegato A), o a Tokyo non si riscontrano problemi perchè qui durante l'inverno ci sarà ancora un'essiccazione dei componenti verso l'esterno.

L'uso dei sistemi in lana minerale negli ambienti caldi e tropicali è più problematico perchè la diffusione al vapore dall'esterno all'interno consente accumulo di umidità tra l'isolante e il substrato. In questo caso è necessaria una modifica sull'intonaco esterno andando contro alle normali regole usate in tutto il mondo; dovrebbe impedire la diffusione di vapore per consentire un effetto anti umidità contro l'aria esterna umida e calda.

## 6. CONCLUSIONI

### 6.0 Risultati ottenuti

In questo studio è stata condotta un'analisi del comportamento dei sistemi ETICS, utilizzando il modello di calcolo WUFI del Fraunhofer Institute, modello validato matematicamente che fornisce la distribuzione delle temperature, dell'umidità e del contenuto d'acqua nel tempo e sviluppa il sistema per diversi climi. Lo scopo è quello di definire la frequenza e l'intensità degli eventi critici, responsabili del processo di invecchiamento e degrado, in diversi contesti ambientali.

L'idea di base è quella di rappresentare al meglio le condizioni climatiche caratteristiche delle città del Sud dell'Europa, in modo da avere un modello il più vicino possibile alle misurazioni fatte sul campo. Per raggiungere questo scopo, abbiamo confrontato i risultati con specifici parametri limite; questo perchè, in molti casi, i processi di degrado dipendono da parecchi parametri, escludendo semplici interpretazioni.

Un problema importante è la reperibilità dei dati: maggiori e precisi ne abbiamo a disposizione, più vicina alla realtà sarà la modellazione.

Durante le tre fasi di studio proposte, il numero di dati climatici e dei materiali a nostra disposizione è aumentato; così da una prima fase in cui abbiamo utilizzato dati climatici senza il riferimento della pioggia ( TRY ) e materiali presi da archivio WUFI, siamo passati ad un dataset climatico completo di tutti i parametri ( METEONORM ) e ad una stratigrafia dell'ETICS più precisa fino ad arrivare alla stratigrafia completa di tutti i materiali che compongono l'ETICS, con i relativi spessori e proprietà caratteristiche.

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Con i dati a disposizione nella prima fase siamo riusciti a condurre un'analisi generale delle frequenze e delle intensità di:

- $T_{est} > 30^{\circ}\text{C}$ ,
- $T_{est} < 0^{\circ}\text{C}$
- $U.R._{est} > 80\%$
- $U.R._{h,12h} > 20$
- $U.R. > 90\%$  senza pioggia.
- $\Delta T_{sup \text{ orario}} > 4^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{sup \text{ giornaliero}} > 4^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{sup \text{ orario}} > 6^{\circ}\text{C}$  e pioggia

Per le esposizioni Nord e Sud e coefficiente di assorbimento solare  $\alpha=0,5$ . Si nota come alcuni risultati ottenuti non fossero attendibili, o quanto meno, ben lontani dalla realtà. Per esempio a Milano veniva registrata una temperatura massima superiore di quella di Palermo.

Nella seconda fase il Dataset METEONORM ha garantito una maggior corrispondenza con la realtà, così siamo andati più nello specifico e abbiamo suddiviso i limiti utilizzati nella precedente analisi per il periodo estivo e il periodo invernale, dando particolare risalto ai cicli di caldo/freddo. Questa suddivisione permette di filtrare i risultati ottenuti in precedenza, confrontando meglio gli eventi critici specifici non solo di un intero anno, ma di una stagione. Infatti in estate si apprezzano maggiormente gli shock termici dovuti alle alte temperature, con minor presenza della pioggia. In inverno shock termici per le basse temperature e alta frequenza di pioggia. Molto interessanti sono le grandi differenze tra le temperature superficiali delle esposizioni a Nord e quelle a Sud.

La terza e ultima fase prevede un'analisi parametrica, valutando per la città presa in esame tutte e quattro le esposizioni per tutto lo spettro di coefficienti di assorbimento solare, da  $\alpha=0,01$  fino ad  $\alpha=0,9$ . Per questa analisi i dati sono stati filtrati passo dopo passo, aggiungendo ogni volta una condizione critica:

- $\Delta$  Temperature Superficiali
- $\Delta$  Temperature Superficiali con la presenza della Pioggia
- $\Delta$  Temperature Superficiali con la presenza della pioggia in estate
- $\Delta$  Temperature Superficiali alle alte Temperature ( $\geq 40^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta$  Temperature Superficiali per Classi di Temperature

Questo tipo di modellazione che propone l'analisi delle frequenze e delle intensità che si verificano sotto questi parametri, fornisce una rappresentazione quanto più vicina alla realtà, che mette in mostra tutte le situazioni più difficili ed estreme a cui è soggetto l'involucro edilizio. In questo studio entrano in gioco un grande numero di parametri:

$$4 \text{ esposizioni} \times 9 \text{ fattori} \times 5 \text{ set di parametri} = 180 \text{ simulazioni}$$



## 6. Conclusioni

In più vanno aggiunte tutte le proprietà dei materiali, alcune delle quali difficili da reperire perchè disponibili solo se sono state effettuate le specifiche prove di laboratorio; per esempio la determinazione del contenuto d'acqua si conosce solo dopo aver effettuato i test secondo la UNI EN ISO 12570. Vista la grande mole di tempo e dati a disposizione per ottenere una simulazione parametrica, abbiamo svolto questo tipo di analisi solo per Milano, Roma e Palermo con lana minerale e EPS.

In definitiva, l'analisi parametrica è una modellazione affidabile che può essere usata come base per la preparazione dei test accelerati di invecchiamento, che tralasciano le condizioni moderate, prendendo subito in considerazione quelle estreme, a condizione che i dati utilizzati, soprattutto quelli climatici, siano completi. Abbiamo visto nella prima fase del capitolo 5 le grandi differenze di temperature climatiche fornite dai due dataset diversi ( WUFI e TRY ) per la stessa città.

E' importante definire fin dall'inizio la stratigrafia del pacchetto, con gli spessori e tutte le proprietà dei materiali.

### 6.1 Linee di sviluppo

Tutte le simulazioni svolte, ed in particolare quella parametrica, sono state condotte per un tipo di stratigrafia. Uno sviluppo successivo è l'analisi di differenti tipi di ETICS, cambiando i tipi e gli spessori di isolante, di intonaco esterno e di substrato, utilizzati nelle diverse nazioni.

Questo studio si concentra maggiormente sugli eventi critici che capitano in estate, visto che ci siamo focalizzati sulle città del Sud Europa; andrebbero analizzati anche i cicli di gelo e disgelo perchè, allo stesso modo dei cicli estivi, sono condizioni molto sfavorevoli per la durabilità. Più dettagliata e approfondita è questa analisi preliminare maggiori informazioni avremo per il successivo sviluppo dei test accelerati di invecchiamento in laboratorio.

Allargandosi sempre più il mercato globale dei sistemi edilizi, c'è la necessità di introdurre nei differenti paesi dei sistemi affidabili e performanti. Se da una parte ci sono misurazioni fatte su lunghi periodi sulla durabilità dei componenti, dati dall'esperienza nel paese di origine, dall'altra non si possono sempre trasferire le stesse linee guida su quel componente, per climi differenti, senza ulteriori studi. Utilizzando un'analisi come la nostra è possibile confrontare il comportamento del sistema a seconda del clima in cui è inserito. Se le condizioni estreme sono simili tra di loro, è molto probabile che il sistema possa essere introdotto e adattato al nuovo contesto, senza che si verifichino guasti inaspettati.

Sarebbe quindi necessario definire una linea guida comune dei parametri che determinano l'invecchiamento per meglio simulare il clima a cui sono associati e poter facilmente confrontare i diversi contesti ambientali. Allo stesso modo queste linee di sviluppo possono essere utilizzate per testare nuovi materiali in ambienti climatici diversi, valutando le differenti proprietà caratteristiche.

L'argomento da noi trattato rientra nel programma di ricerca per la valutazione di durabilità degli ETICS con lana minerale Rockwool e prevede un ulteriore sviluppo delle simulazioni di trasferimento di calore ed umidità, prove di laboratorio per la valutazione delle caratteristiche effettive dei materiali impiegati, così come l'analisi del comportamento meccanico per diversi tipi di rivestimento (fondo e finitura) nelle differenti condizioni climatiche.

Al termine di questi studi sarà possibile valutare come il ridotto stress meccanico sulle malte di adesione e sul rivestimento di fondo e finitura consenta l'uso degli ETICS con lana minerale in una più

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

ampia gamma di climi, e valutarne le prestazioni durabilistiche delle soluzioni che meglio si adattano al contesto ambientale.

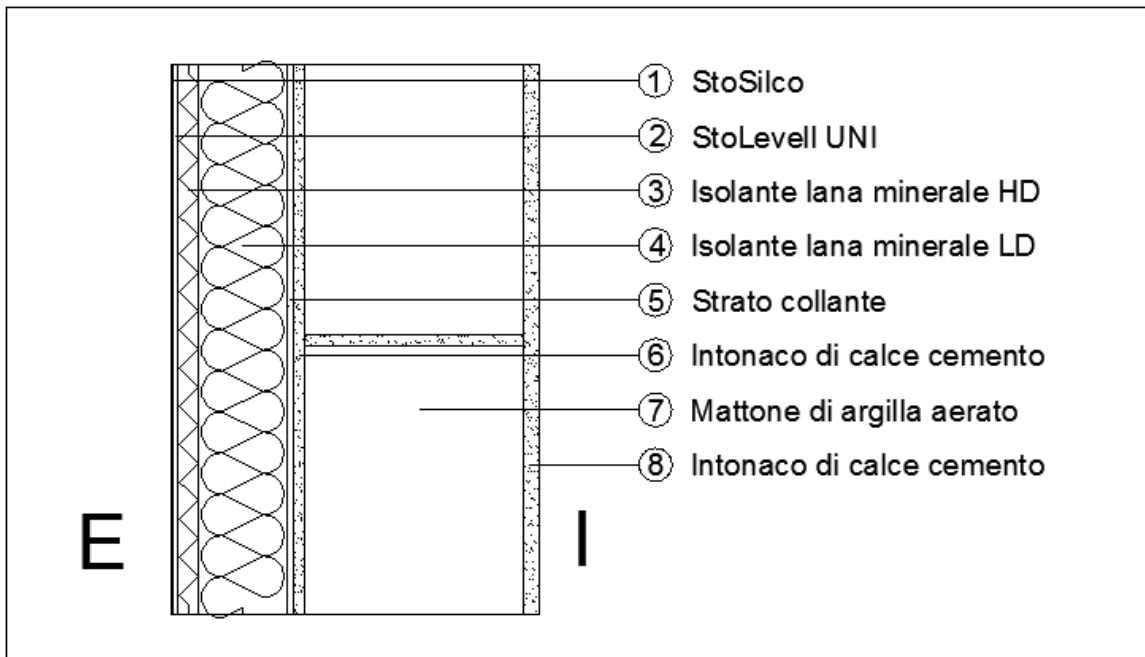
# ALLEGATO A

## PROPRIETÀ MATERIALI ETICS



## ETICS\_Proprietà dei materiali

Stratigrafia ETICS analizzato e tabella riassuntiva delle proprietà dei materiali.



ETICS						
		Sp.	$\rho$	$\lambda_{\text{DRY,@10}^\circ\text{C}}$	$\mu$	Porosity
		[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[-]
Ext						
1	Sto Silco	0.002	1340	0.7	150	0.36
2	Sto Levell Uni	0.005	1200	0.87	25	0.36
3	MW ( alta densità)	0.018	146	0.033	1.1	0.95
4	MW ( bassa densità)	0.082	71	0.032	1.2	0.95
5	Strato collante	0.005	833	0.155	15	0.686
6	Intonaco di calce cemento	0.01	1900	0.8	19	0.24
7	Laterizio	0.2	650	0.13	15	0.74
8	Intonaco di calce cemento	0.015	1900	0.8	19	0.24
Int						

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

1_ Materiale		Intonaco di finitura (STO SILCO)				Sp. 0,002 m			
Density		$\rho$		1340	[kg/m <sup>3</sup> ]				
Porosity		N		0.3	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]				
Conductivity (dry)		$\lambda$		0.7	[W/mK]				
Specific heat capacity		$c_s$		1500	[J/kgK]				
Water vapour diffusion resistance		$\mu$		150	[-]				
Typical water content		$w_c$		45 **	[kg/m <sup>3</sup> ]				
Moisture dependent thermal conductivity supplement		N.A. ***		[%/M - %]					
Reference water content		N.A.		[kg/m <sup>3</sup> ]					
Free water saturation		350		[kg/m <sup>3</sup> ]					
Water absorption coefficient		0.00083		[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]					
Moisture storage function*		Liquid transport coefficient Suction**		Liquid transport coefficient Redistribution**		$\lambda$ moisture dependent		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	N.A.	0	0	0	0	0	0.7	0	150
0.1	N.A.	3.10	2.3E-14	3.10	2.3E-14				
0.2	N.A.	350	2.1E-11	350	2.1E-12				
0.3	N.A.								
0.4	N.A.								
0.5	N.A.								
0.55	N.A.								
0.6	N.A.								
0.65	N.A.								
0.7	N.A.								
0.75	N.A.								
0.8	N.A.								
0.85	N.A.								
0.9	N.A.								
0.91	N.A.								
0.92	N.A.								
0.93	N.A.								
0.94	N.A.								
0.95	N.A.								
0.96	N.A.								
0.97	N.A.								
0.98	N.A.								
0.99	N.A.								
1.0	N.A.								

\* Porosità non disponibile. La moisture storage function deve essere misurata.

\*\* A  $W_c$  non disponibile, non è possibile calcolare il coeff. di trasporto liquido. I dati riportati sono approssimati da WUFI.

\*\*\* Vengono assunti valori tipici di altre malte e intonaci.

Allegato A

2_Materiale		Intonaco di base (STO LEVELL UNI)				Sp. 0,005 m			
Density		$\rho$	1200	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Porosity		N	0.3	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]					
Conductivity (dry)		$\lambda$	0.87	[W/mK]					
Specific heat capacity		$c_s$	850	[J/kgK]					
Water vapour diffusion resistance		$\mu$	25	[-]					
Typical water content		$w_c$	N.A. ***	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Moisture dependent thermal conductivity supplement		N.A. ***	[%/M - %]						
Reference water content		N.A. ***	[kg/m <sup>3</sup> ]						
Free water saturation		260	[kg/m <sup>3</sup> ]						
Water absorption coefficient		0.0015	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]						
Moisture storage function*		Liquid transport coefficient Suction**		Liquid transport coefficient Redistribution**		$\lambda$ moisture dependent		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	N.A.	0	0	0	0	0	0.87	0	25
0.1	N.A.	17	2E-13	17	2E-13				
0.2	N.A.	260	1.3E-10	260	1.2E-11				
0.3	N.A.								
0.4	N.A.								
0.5	N.A.								
0.55	N.A.								
0.6	N.A.								
0.65	N.A.								
0.7	N.A.								
0.75	N.A.								
0.8	N.A.								
0.85	N.A.								
0.90	N.A.								
0.95	N.A.								

\* Porosità non disponibile. La moisture storage function deve essere misurata.

\*\* A  $W_c$  non disponibile, non è possibile calcolare il coeff. di trasporto liquido. I dati riportati sono approssimati da WUFI.

\*\*\* Vengono assunti valori tipici di altre malte e intonaci.

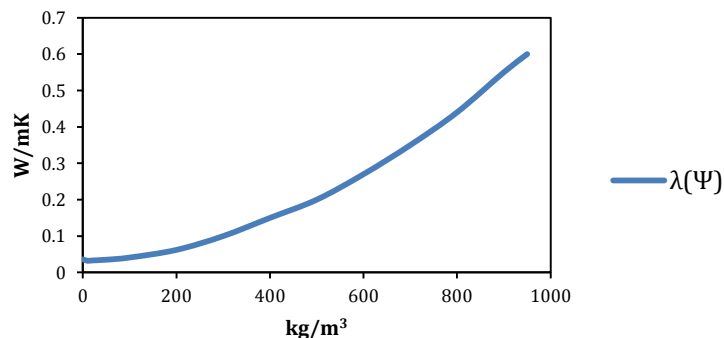
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

3_Materiale		Rockwool FrontRock Max E HD				Sp. 0,018 m			
Density		$\rho$		155		[kg/m <sup>3</sup> ]			
Porosity		n		0.94		[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]			
Conductivity (dry)		$\lambda$		0.033		[W/mK]			
Specific heat capacity		$c_s$		1030		[J/kgK]			
Water vapour diffusion resistance		$\mu$		1		[-]			
Typical water content		$w_c$		0		[kg/m <sup>3</sup> ]			
Moisture dependent thermal conductivity supplement						[%/M - %]			
Reference water content						[kg/m <sup>3</sup> ]			
Free water saturation		940				[kg/m <sup>3</sup> ]			
Water absorption coefficient		Roxul				[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]			
Moisture storage function*		Liquid transport coefficient Suction**		Liquid transport coefficient Redistribution**		$\lambda$ moisture dependent *		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	N.A.					0	0.033		
0.1	N.A.					10	0.033		
0.2	N.A.					20	0.034		
0.3	N.A.					50	0.036		
0.4	N.A.					100	0.042		
0.5	N.A.					200	0.063		
0.55	N.A.					300	0.1		
0.6	N.A.					400	0.15		
0.65	N.A.					500	0.2		
0.7	N.A.					600	0.27		
0.75	N.A.					700	0.35		
0.8	N.A.					800	0.44		
0.85	N.A.					900	0.55		
0.90	N.A.					950	0.6		
0.95	N.A.								

\* Porosità non disponibile. La moisture storage function deve essere misurata.

\*\* A  $W_c$  non disponibile, non è possibile calcolare il coeff. di trasporto liquido. I dati riportati sono approssimati da WUFI.

\*\*\* Vengono assunti valori tipici di altre malte e intonaci.



\* Curve included in the WUFI database for Roxul ConRock, n=0,95



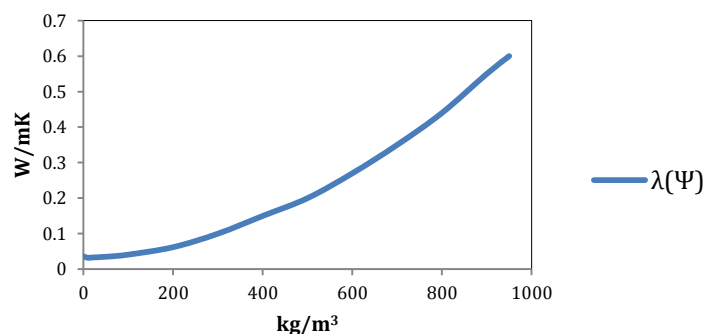
Allegato A

3_Materiale		Rockwool FrontRock Max E LD				Sp. 0,082 m			
Density		$\rho$	80	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Porosity		N	0.97	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]					
Conductivity (dry)		$\lambda$	0.032	[W/mK]					
Specific heat capacity		$c_s$	1030	[J/kgK]					
Water vapour diffusion resistance		$\mu$	1	[-]					
Typical water content		$w_c$	N.A.	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Moisture dependent thermal conductivity supplement		0	[%/M - %]						
Reference water content			[kg/m <sup>3</sup> ]						
Free water saturation		970	[kg/m <sup>3</sup> ]						
Water absorption coefficient		Roxul	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]						
Moisture storage function*		Liquid transport coefficient Suction**		Liquid transport coefficient Redistribution**		$\lambda$ moisture dependent		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	N.A.					0	0.032		
0.1	N.A.					10	0.032		
0.2	N.A.					20	0.033		
0.3	N.A.					50	0.035		
0.4	N.A.					100	0.041		
0.5	N.A.					200	0.062		
0.55	N.A.					300	0.1		
0.6	N.A.					400	0.15		
0.65	N.A.					500	0.2		
0.7	N.A.					600	0.27		
0.75	N.A.					700	0.35		
0.8	N.A.					800	0.44		
0.85	N.A.					900	0.55		
0.90	N.A.					950	0.6		
0.95	N.A.								

\* Porosità non disponibile. La moisture storage function deve essere misurata.

\*\* A  $W_c$  non disponibile, non è possibile calcolare il coeff. di trasporto liquido. I dati riportati sono approssimati da WUFI.

\*\*\* Vengono assunti valori tipici di altre malte e intonaci.



\* Curve included in the WUFI database for Roxul CavityRock, n=0,95

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

4_Materiale		Intonaco di calce cemento						Sp. 0,01 m	
Density				$\rho$	2000	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Porosity				n	0.3	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]			
Conductivity (dry)				$\lambda$	1.2	[W/mK]			
Specific heat capacity				$c_s$	850	[J/kgK]			
Water vapour diffusion resistance				$\mu$	25	[-]			
Typical water content				$w_c$	280	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Moisture dependent thermal conductivity supplement				10	[%/M - %]				
Reference water content				35	[kg/m <sup>3</sup> ]				
Free water saturation				280	[kg/m <sup>3</sup> ]				
Water absorption coefficient						[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]			
Moisture storage function		Liquid transport coefficient Suction		Liquid transport coefficient Redistribution		$\lambda$ moisture dependent		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	0	0	0	0	0	0	1.2	0	25
0.1	1.11	25	9E-12	25	9E-12	300	3000		
0.2	2.48	280	2.9E-9	280	3E-10				
0.3	4.22								
0.4	6.51								
0.5	9.66								
0.55	11.71								
0.6	14.24								
0.65	17.42								
0.7	21.54								
0.75	27.1								
0.8	35.0								
0.85	47.13								
0.95	113.19								
0.96	129.23								
0.97	150.06								
0.98	178.18								
0.99	218.27								
1.0	280.0								

Allegato A

5_ Materiale		Mattone d'argilla aerato				Sp. 0,2 m			
Density		$\rho$	650,0	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Porosity		n	0.74	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]					
Conductivity (dry)		$\lambda$	0.13	[W/mK]					
Specific heat capacity		$c_s$	850.0	[J/kgK]					
Water vapour diffusion resistance		$\mu$	15.0	[-]					
Typical water content		$w_c$	100	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Moisture dependent thermal conductivity supplement				[%/M - %]					
Reference water content		15	[kg/m <sup>3</sup> ]						
Free water saturation		178	[kg/m <sup>3</sup> ]						
Water absorption coefficient				[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]					
Moisture storage function		Liquid transport coefficient Suction		Liquid transport coefficient Redistribution		$\lambda$ moisture dependent		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	0	0	0	0	0	0	0.040	0	15
0.1	0.45	15.0	1.6E-10	15.0	1.6E-10	10	0.040		
0.2	1.02	178	1.35E-10	178	7.5E-10	20	0.041		
0.3	1.74					50	0.043		
0.4	2.69					100	0.049		
0.5	4.00					200	0.070		
0.55	4.87					300	0.100		
0.6	5.94					400	0.150		
0.65	7.29					500	0.200		
0.7	9.07					600	0.270		
0.75	11.49					700	0.350		
0.8	15.0					800	0.440		
0.85	20.53					900	0.550		
0.95	54.14					950	0.600		
0.96	63.32								
0.97	75.93								
0.98	94.33								
0.99	123.69								
1.0	178.0								

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

6_ Materiale		Intonaco di calce cemento				Sp. 0,015 m			
Density				$\rho$	2000	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Porosity				n	0.3	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]			
Conductivity (dry)				$\lambda$	1.2	[W/mK]			
Specific heat capacity				$c_s$	850	[J/kgK]			
Water vapour diffusion resistance				$\mu$	25	[-]			
Typical water content				$w_c$	280	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Moisture dependent thermal conductivity supplement				10	[%/M - %]				
Reference water content				35	[kg/m <sup>3</sup> ]				
Free water saturation				280	[kg/m <sup>3</sup> ]				
Water absorption coefficient					[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]				
Moisture storage function		Liquid transport coefficient Suction		Liquid transport coefficient Redistribution		$\lambda$ moisture dependent		$\mu$ moisture dependent	
RH [%]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWW [m <sup>2</sup> /s]	$W_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	RH [%]	$\mu$ [-]
0	0	0	0	0	0	0	1.2	0	25
0.1	1.11	25	9E-12	25	9E-12	300	3000		
0.2	2.48	280	2.9E-9	280	3E-10				
0.3	4.22								
0.4	6.51								
0.5	9.66								
0.55	11.71								
0.6	14.24								
0.65	17.42								
0.7	21.54								
0.75	27.1								
0.8	35.0								
0.85	47.13								
0.95	113.19								
0.96	129.23								
0.97	150.06								
0.98	178.18								
0.99	218.27								
1.0	280.0								





# ALLEGATO B

## ANALISI DATI CLIMATICI CITTÀ

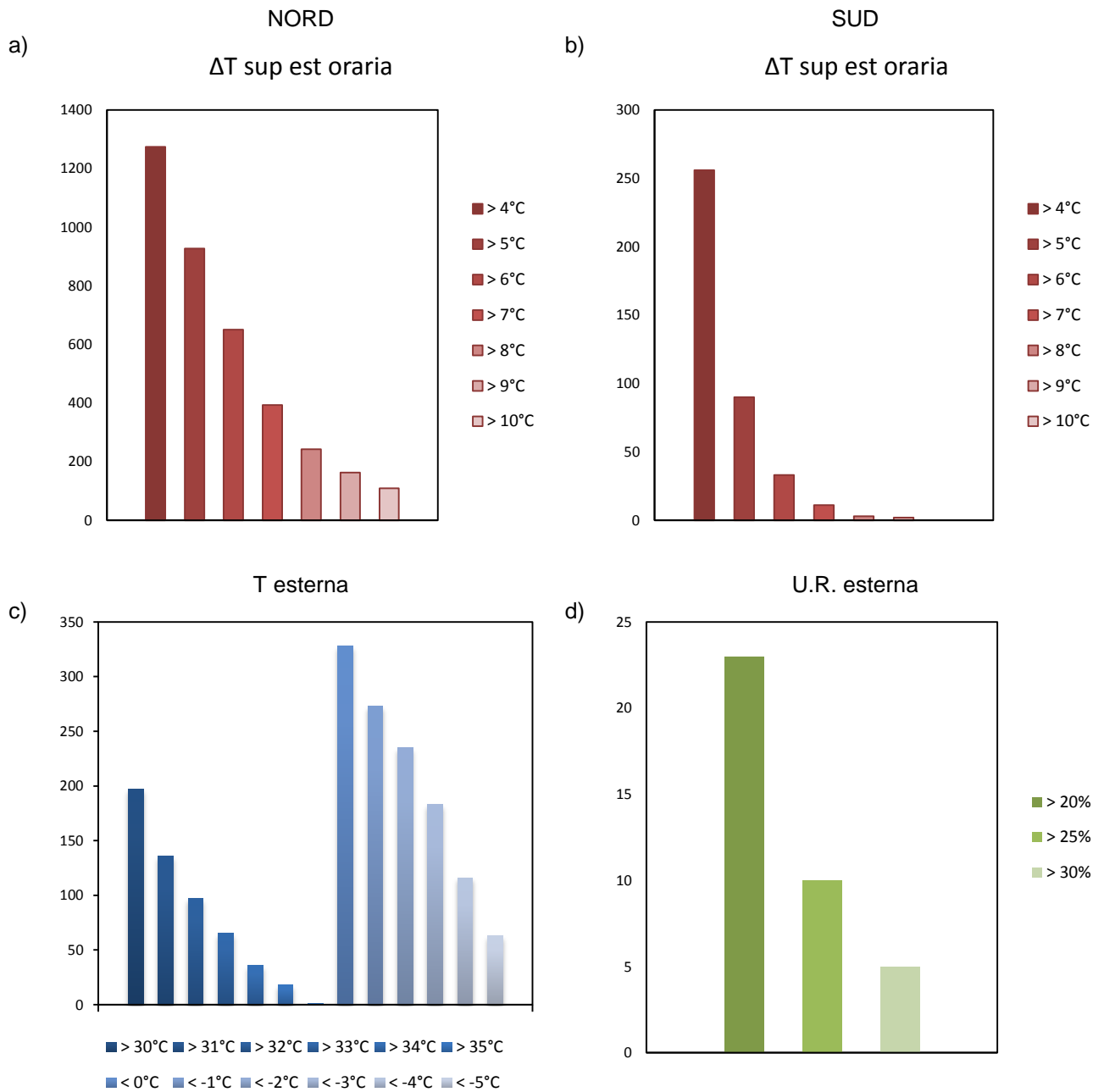
### B.0 Prima Fase

Francia : 1\_Grenoble  
2\_Marsiglia  
Grecia : 3\_Atene  
Italia : 4\_Bolzano  
5\_Modena  
6\_Napoli  
7\_Palermo  
8\_Roma  
9\_Trieste

Portogallo : 10\_Lisbona  
Spagna : 11\_Barcellona  
12\_Bilbao  
13\_Malaga  
14\_Palma di Maiorca  
Svizzera : 15\_Davos  
16\_Locarno  
17\_Zurigo  
Turchia : 18\_Istanbul  
19\_Smirne

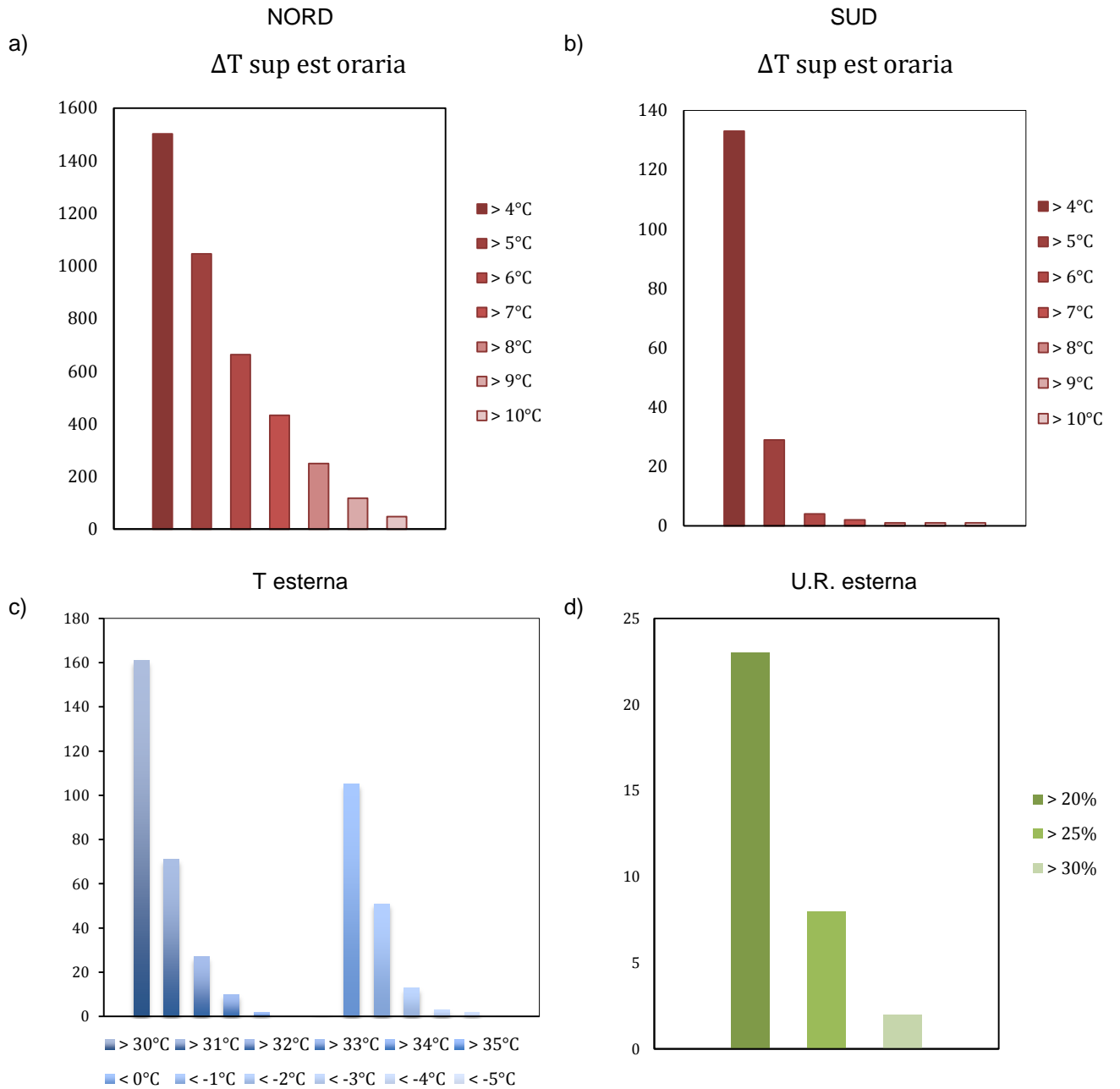
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

1\_Grenoble



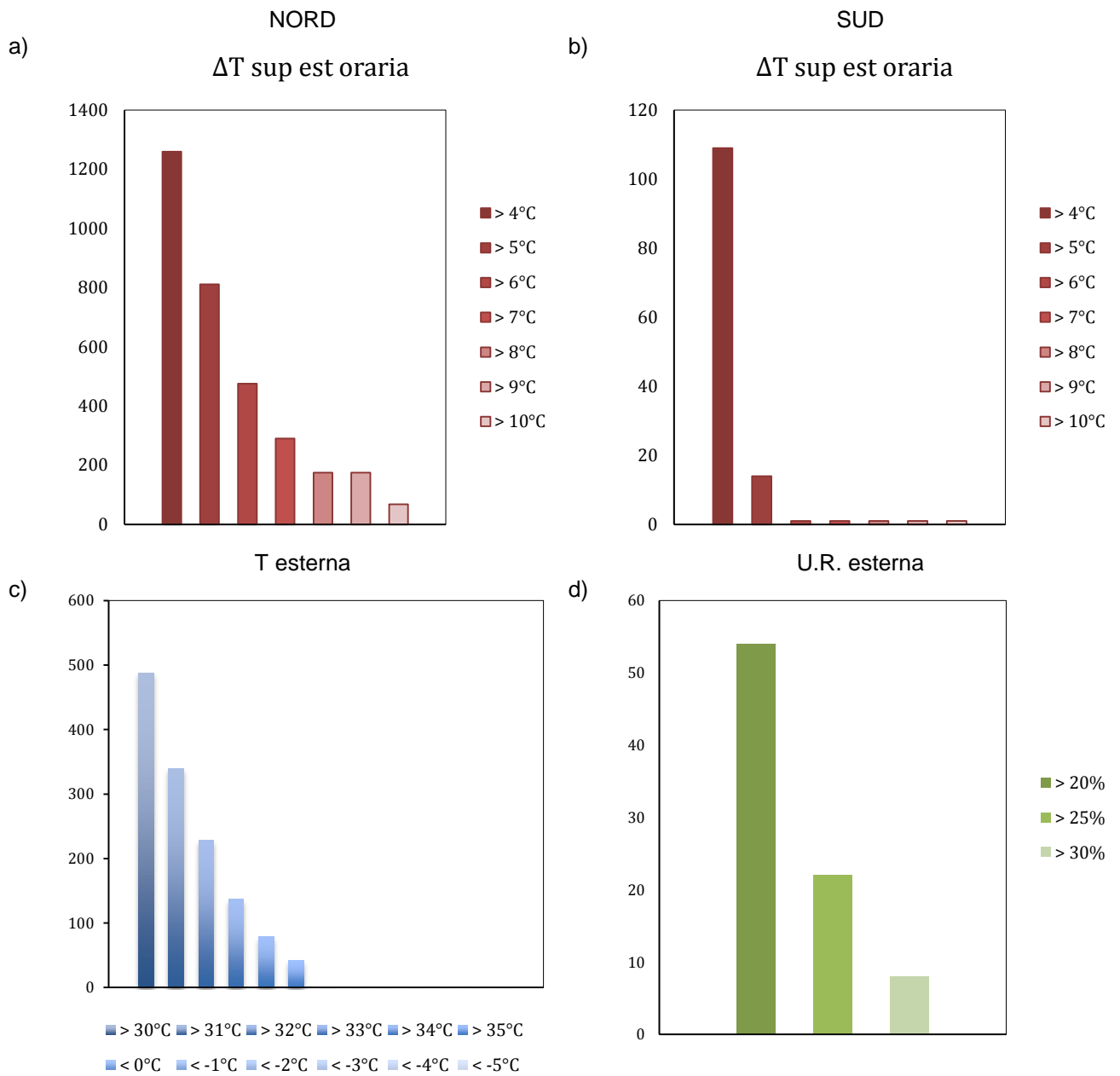


2\_Marsiglia

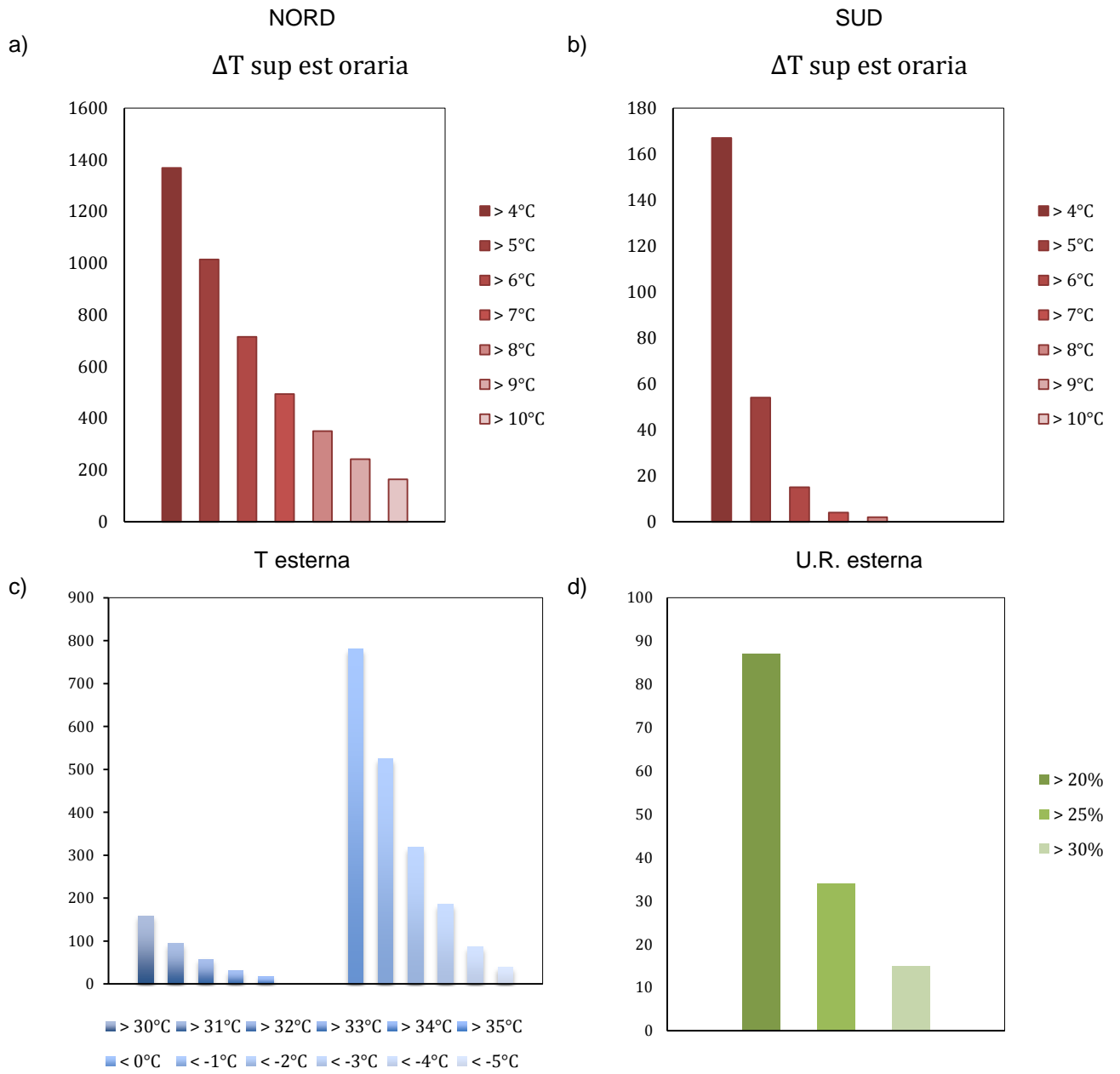


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

3\_Atene

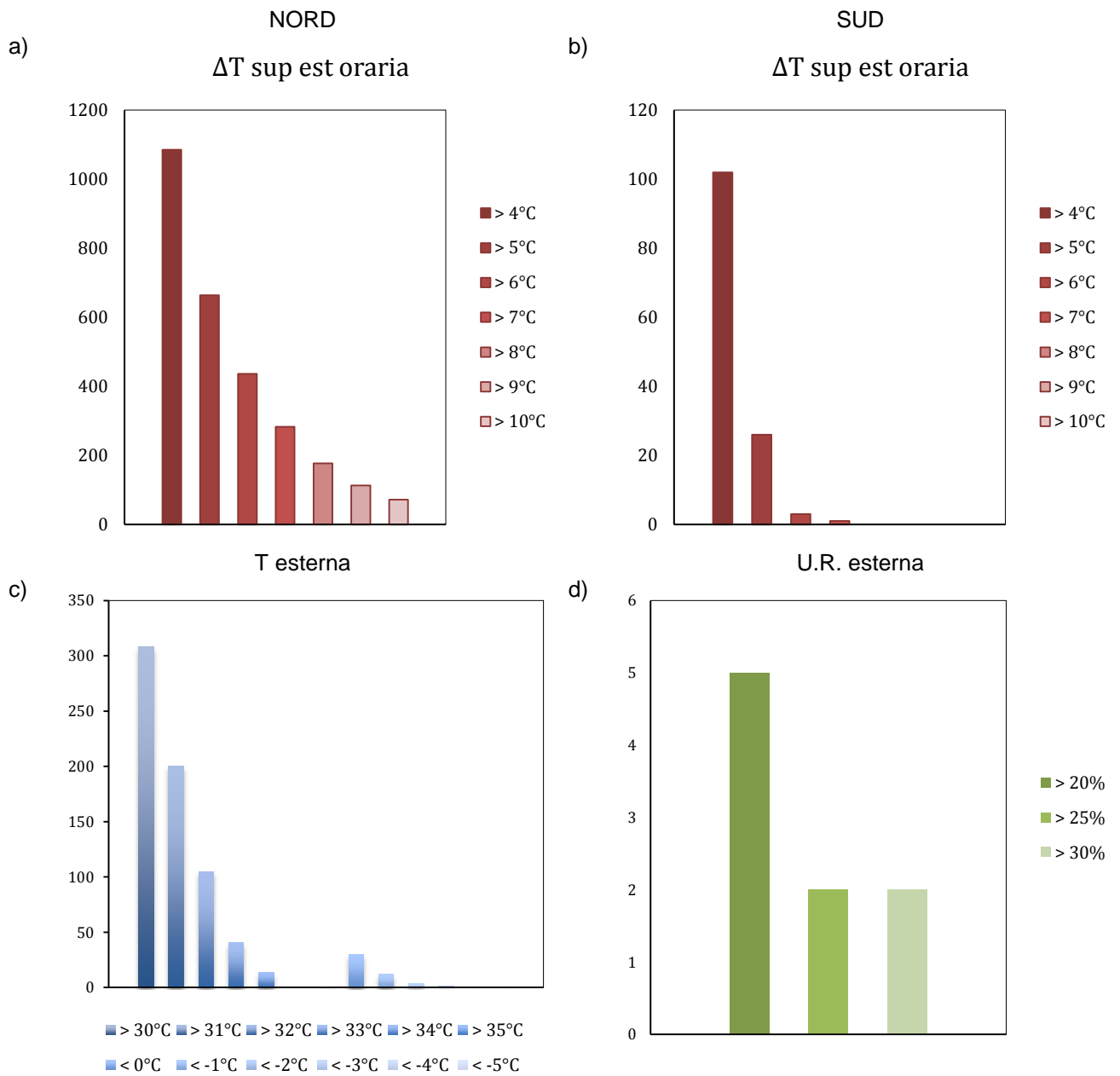


4\_Bolzano

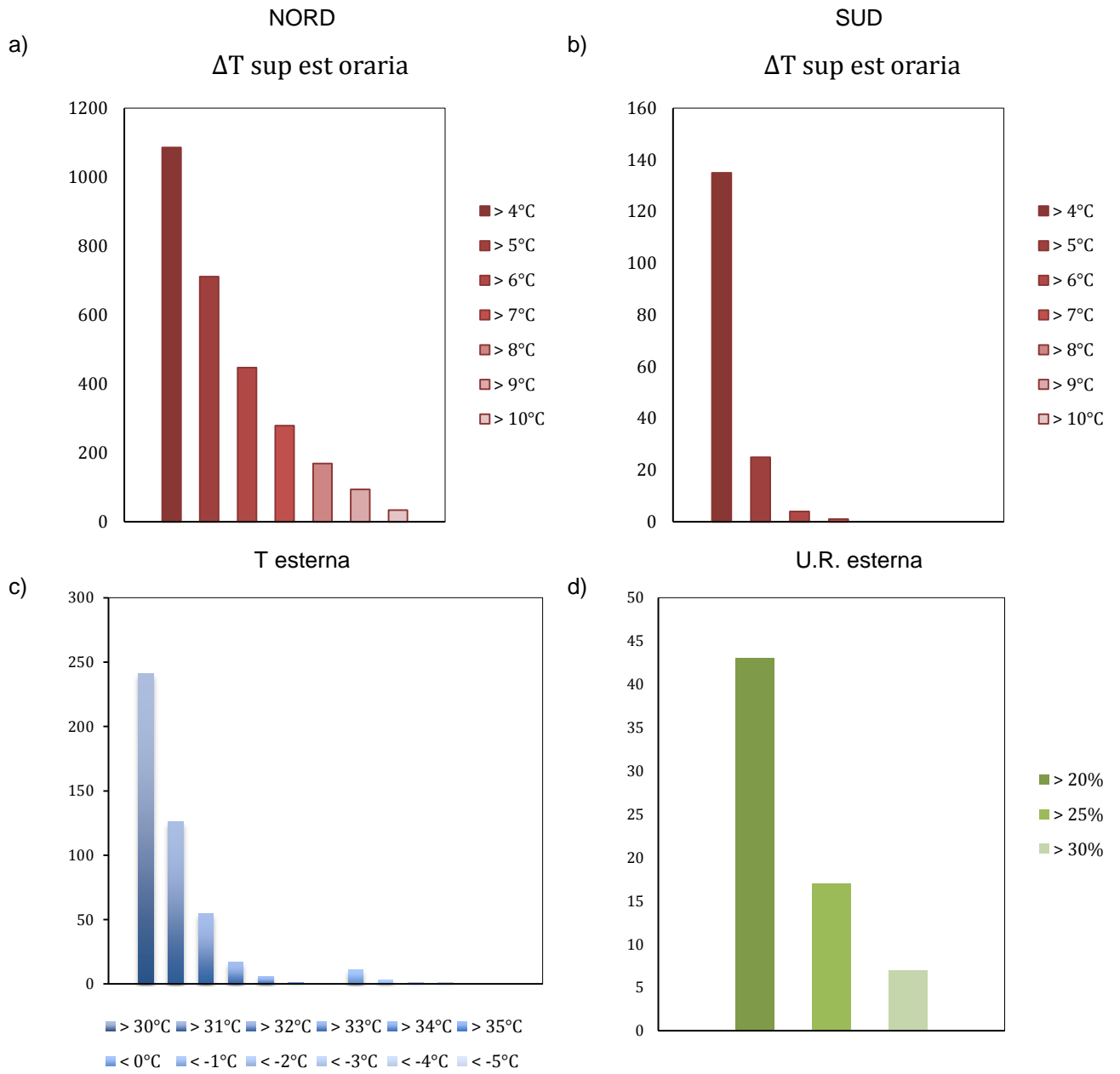


Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto

5\_Modena

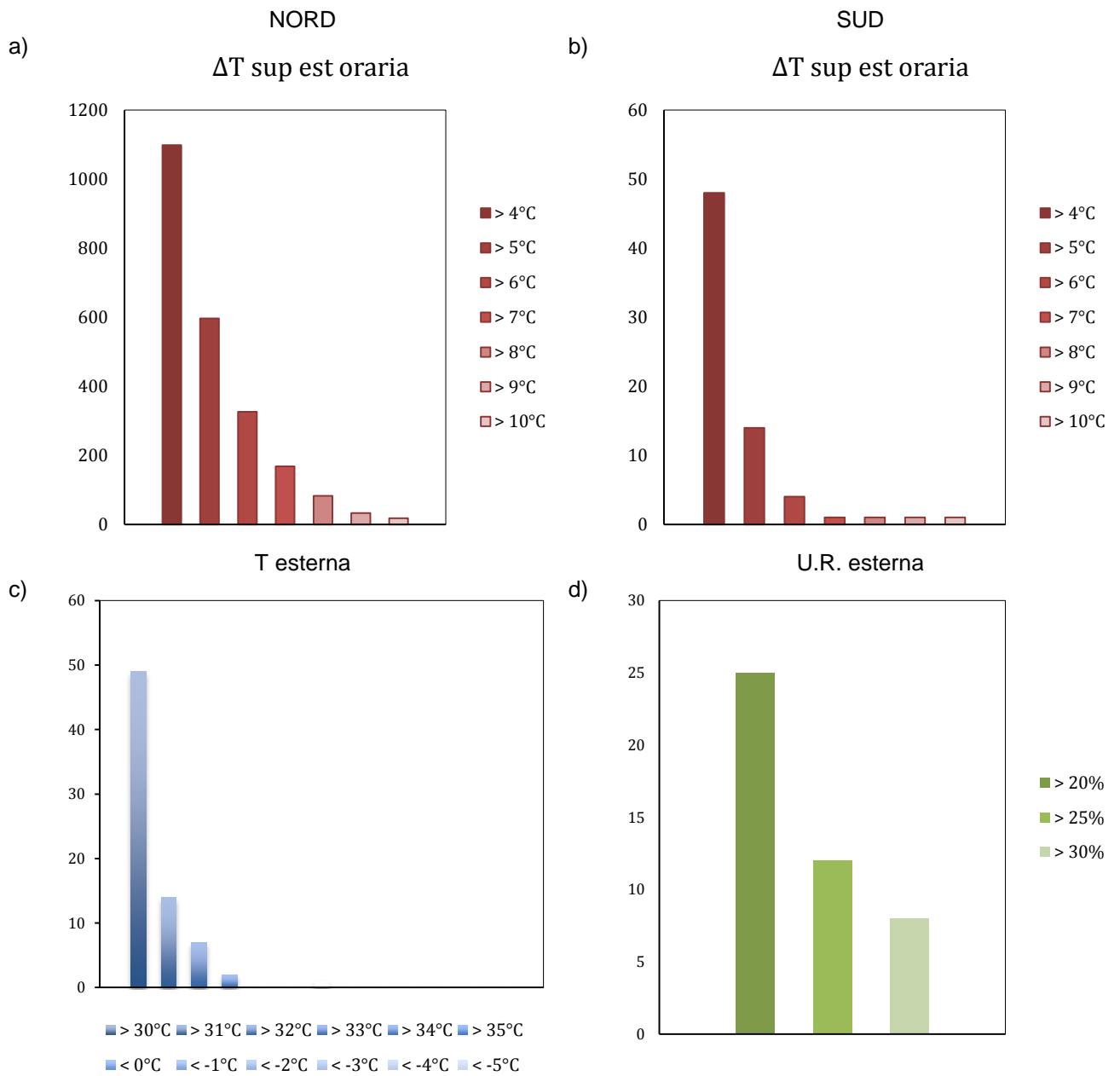


6\_Napoli

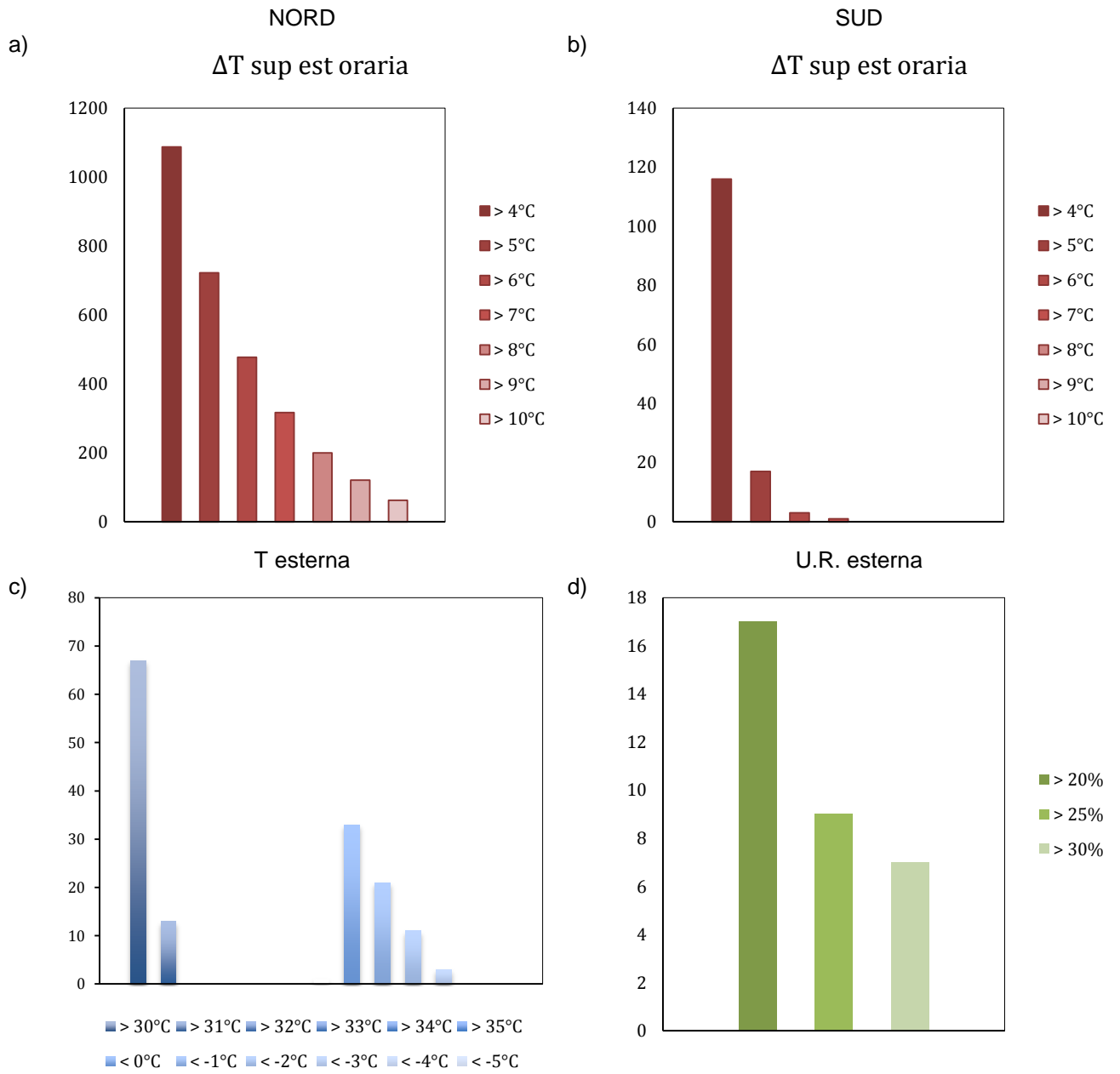


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

7\_Palermo

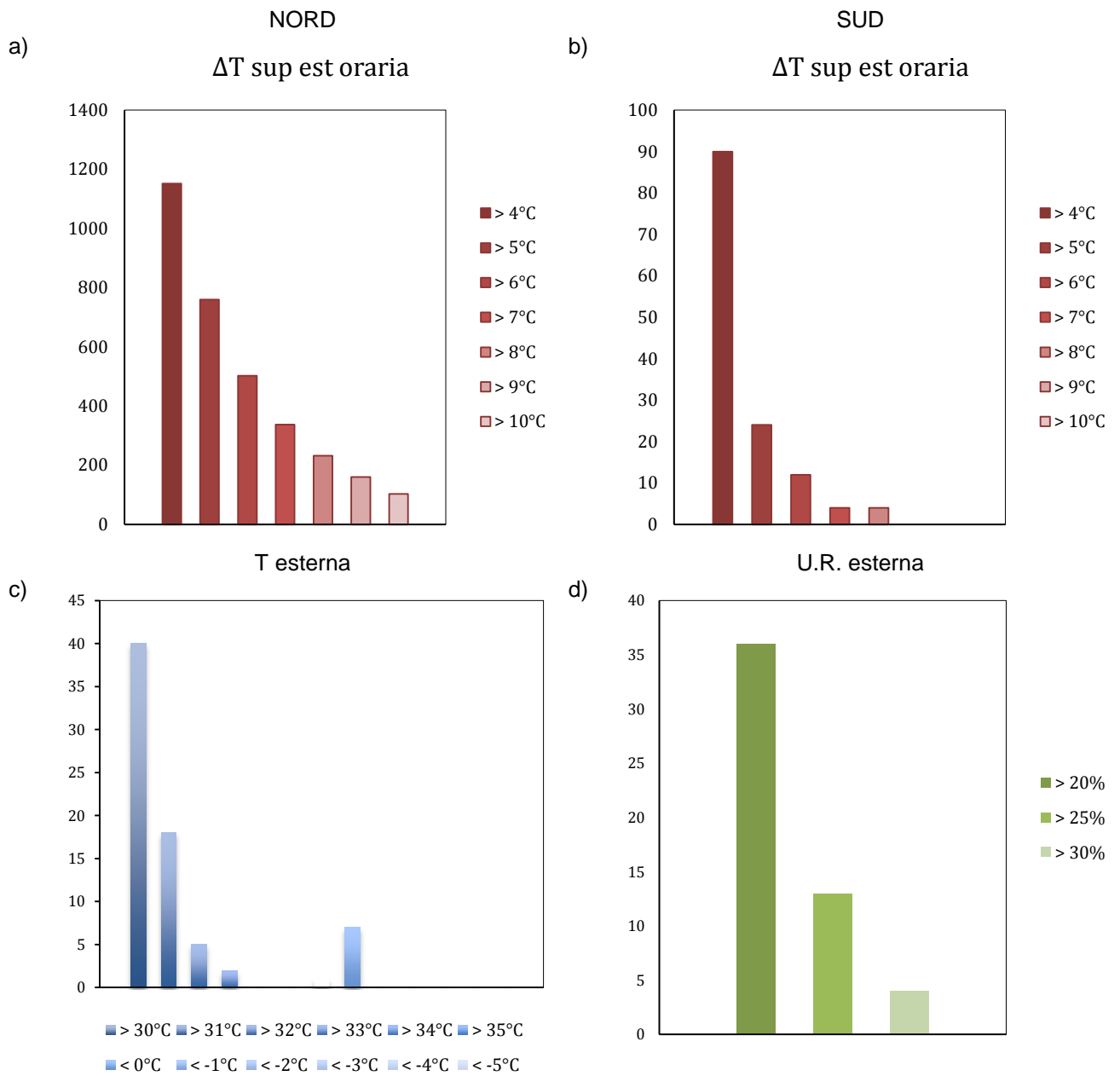


8\_Roma



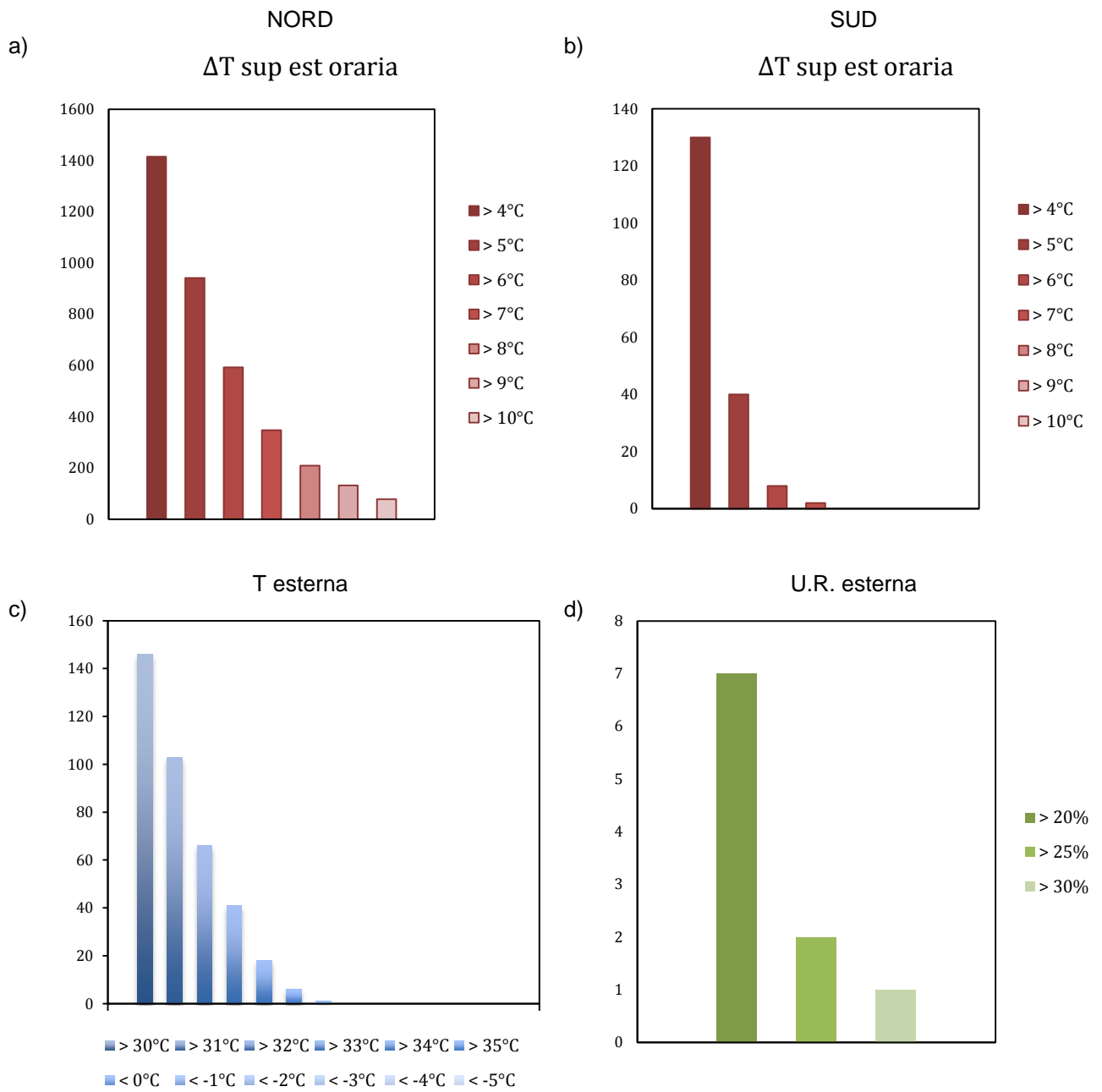
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

9\_Trieste



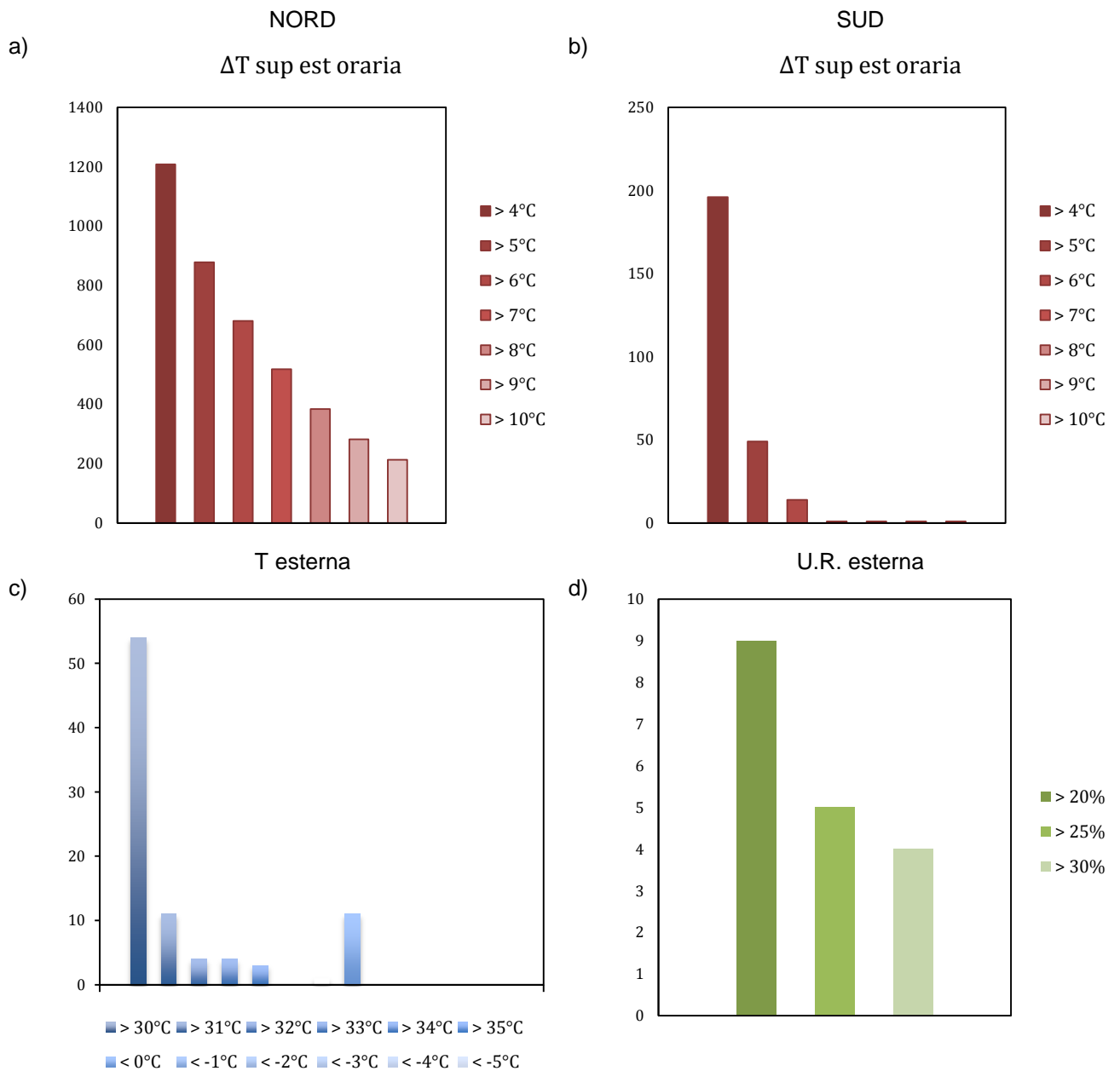


10\_Lisbona

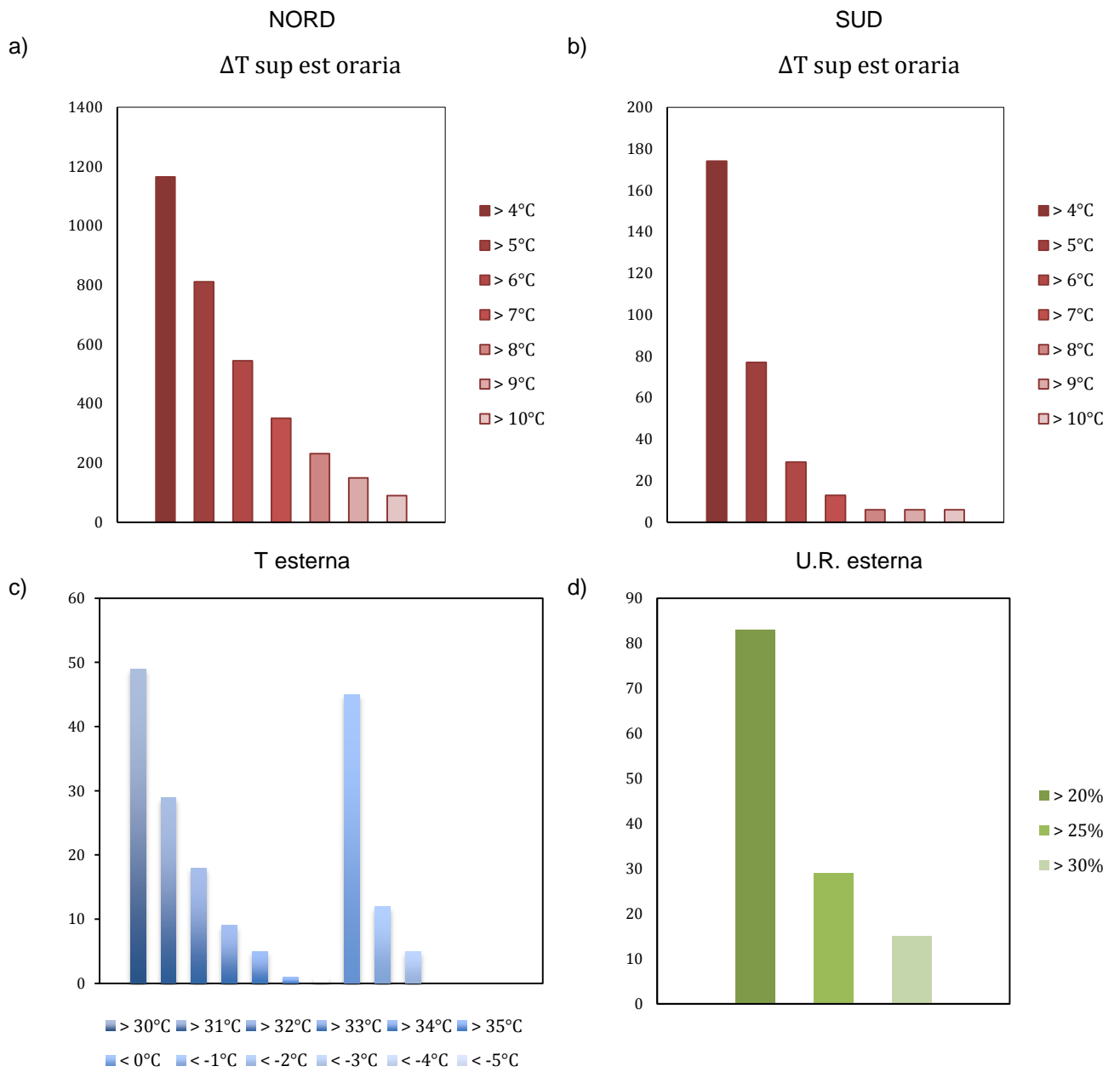


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

11\_Barcellona

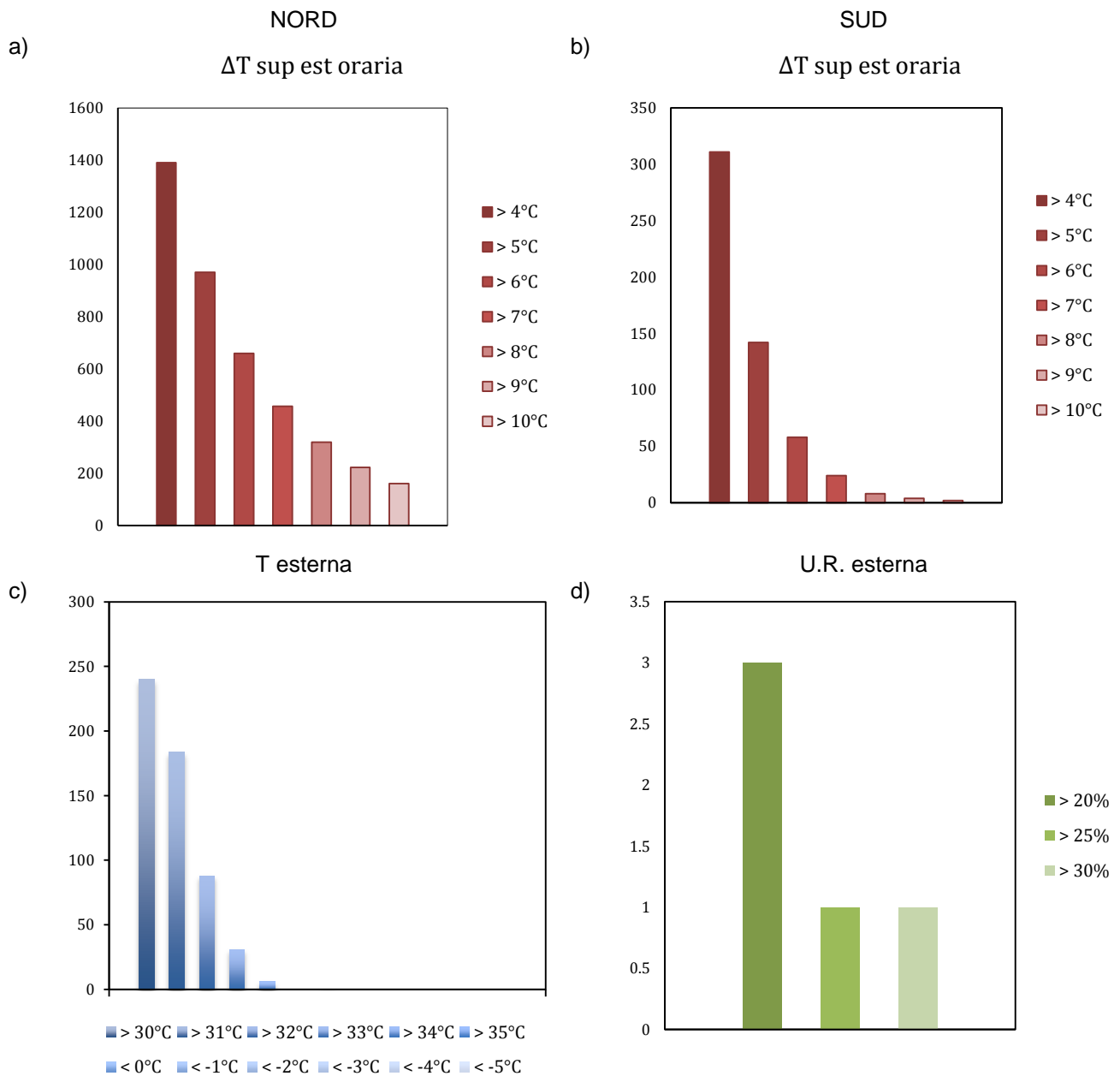


12\_Bilbao

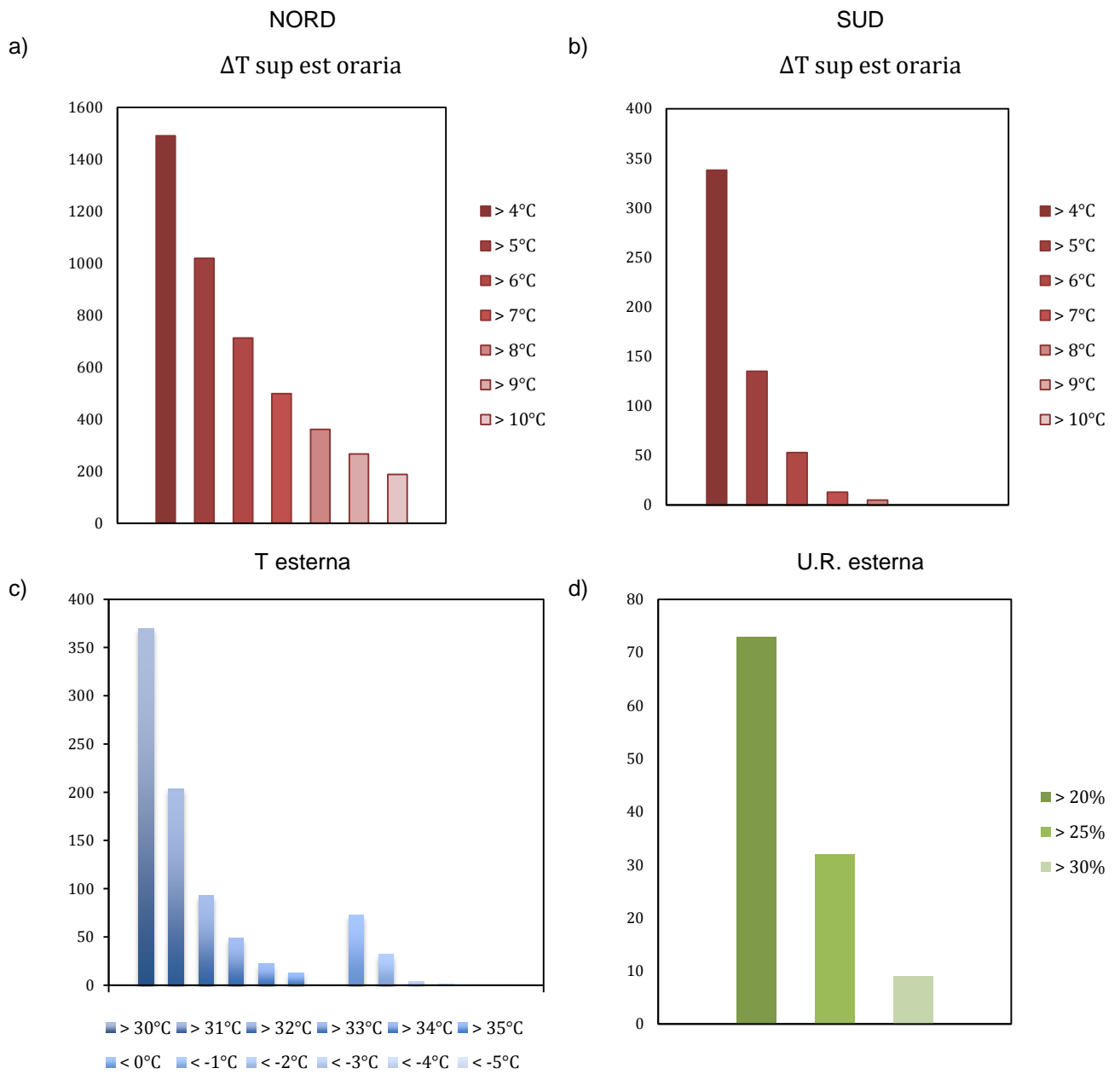


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

13\_Malaga

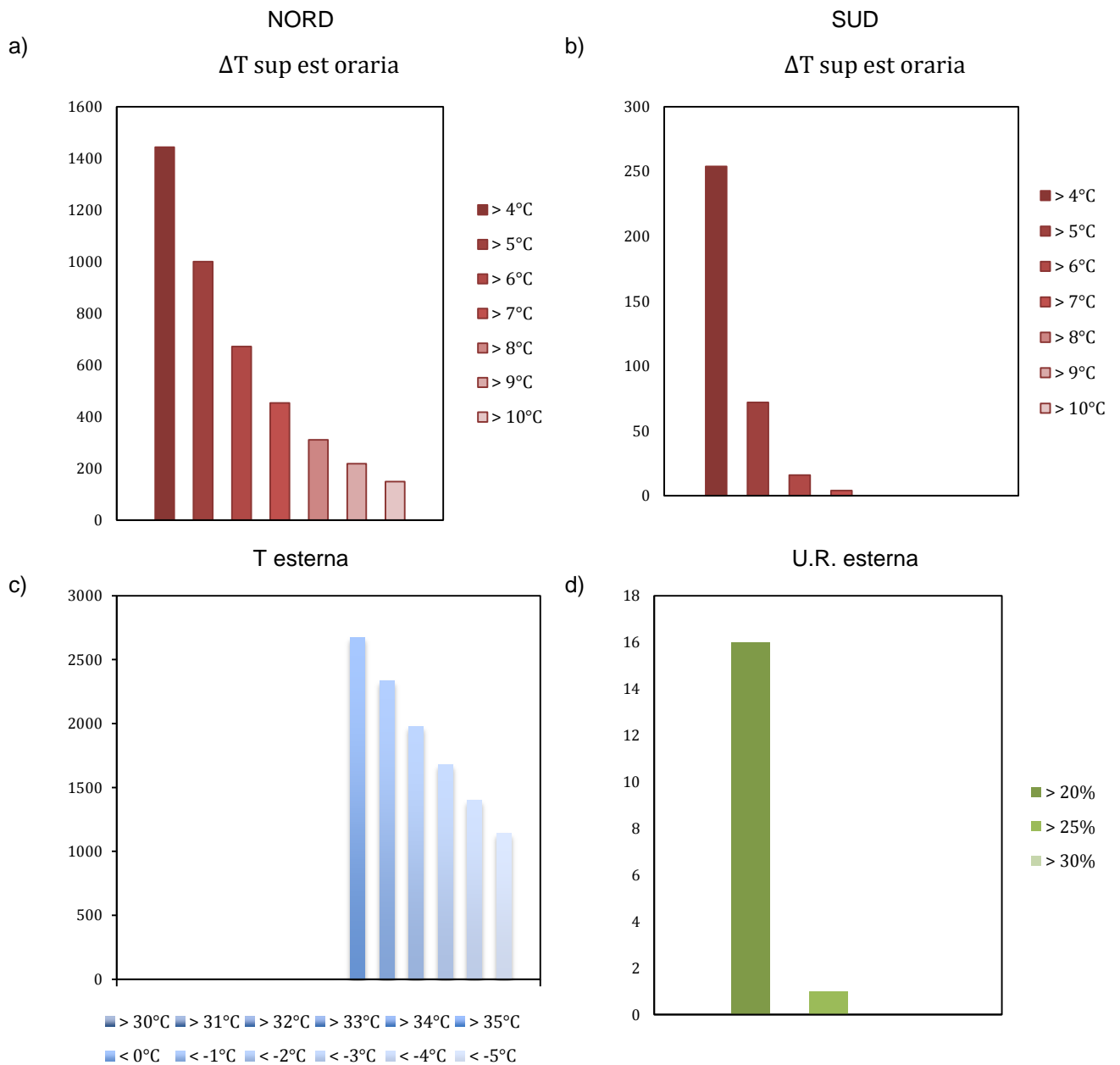


14\_Palma di Maiorca

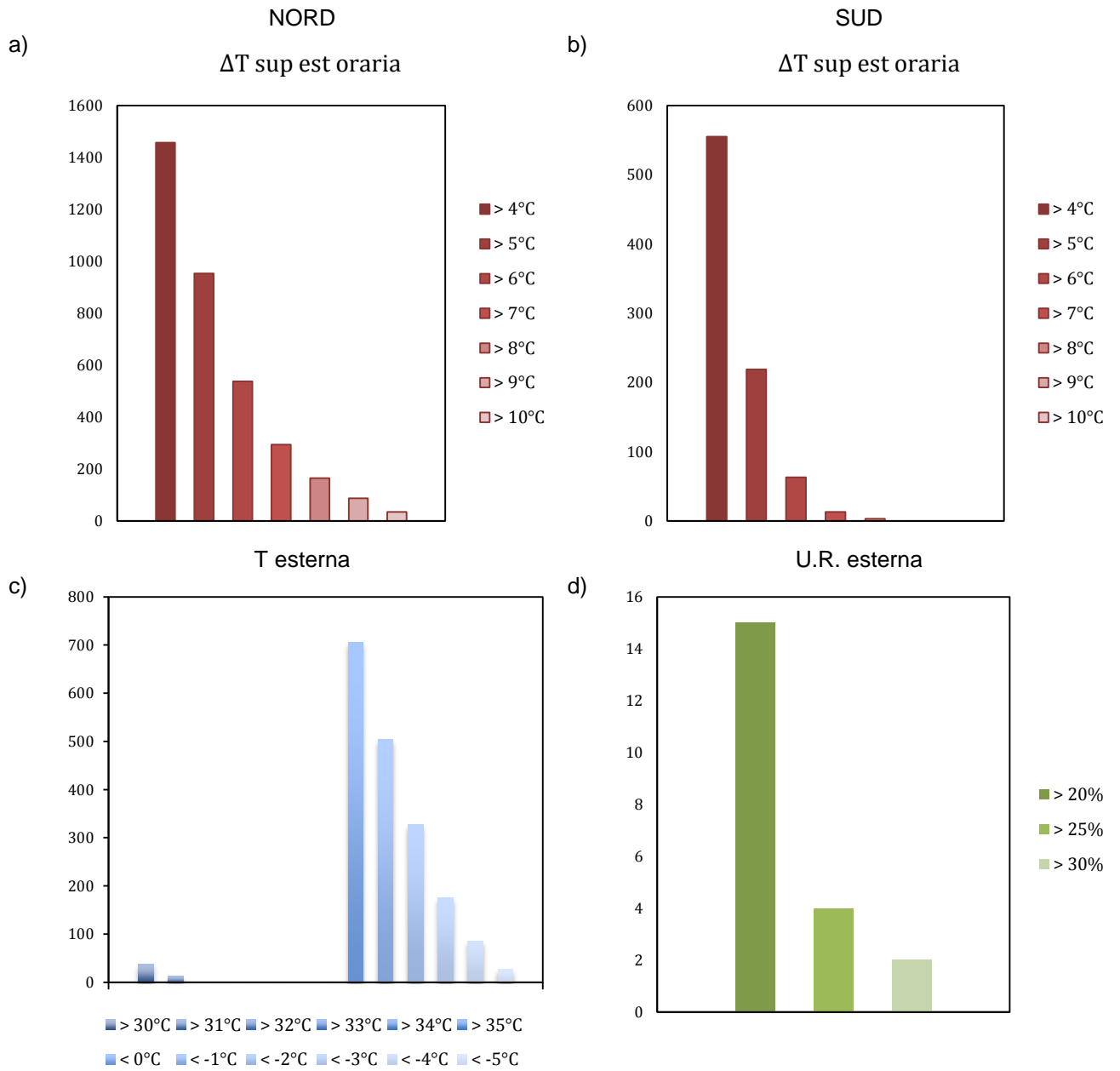


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

15\_Davos

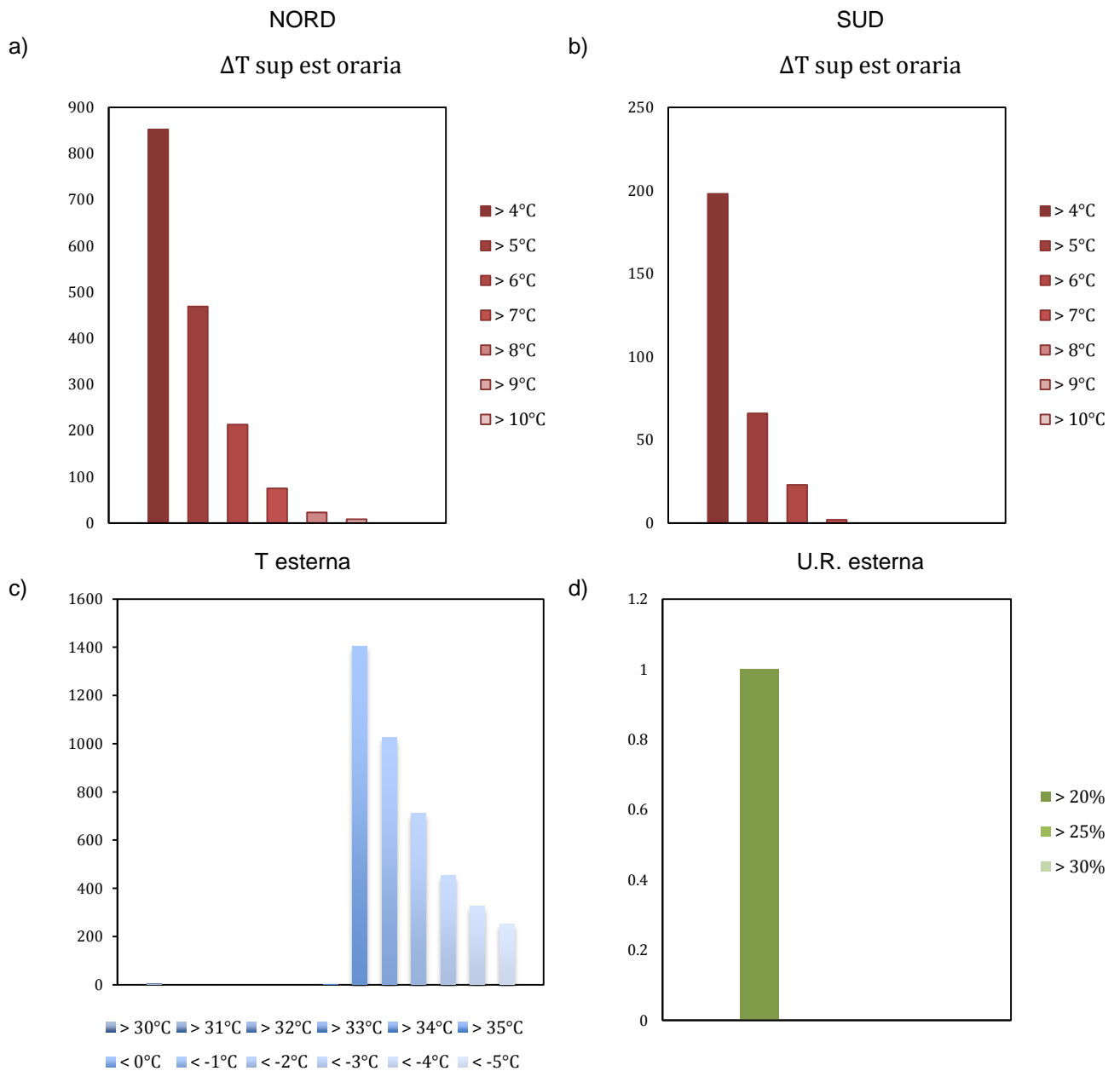


16\_Locarno



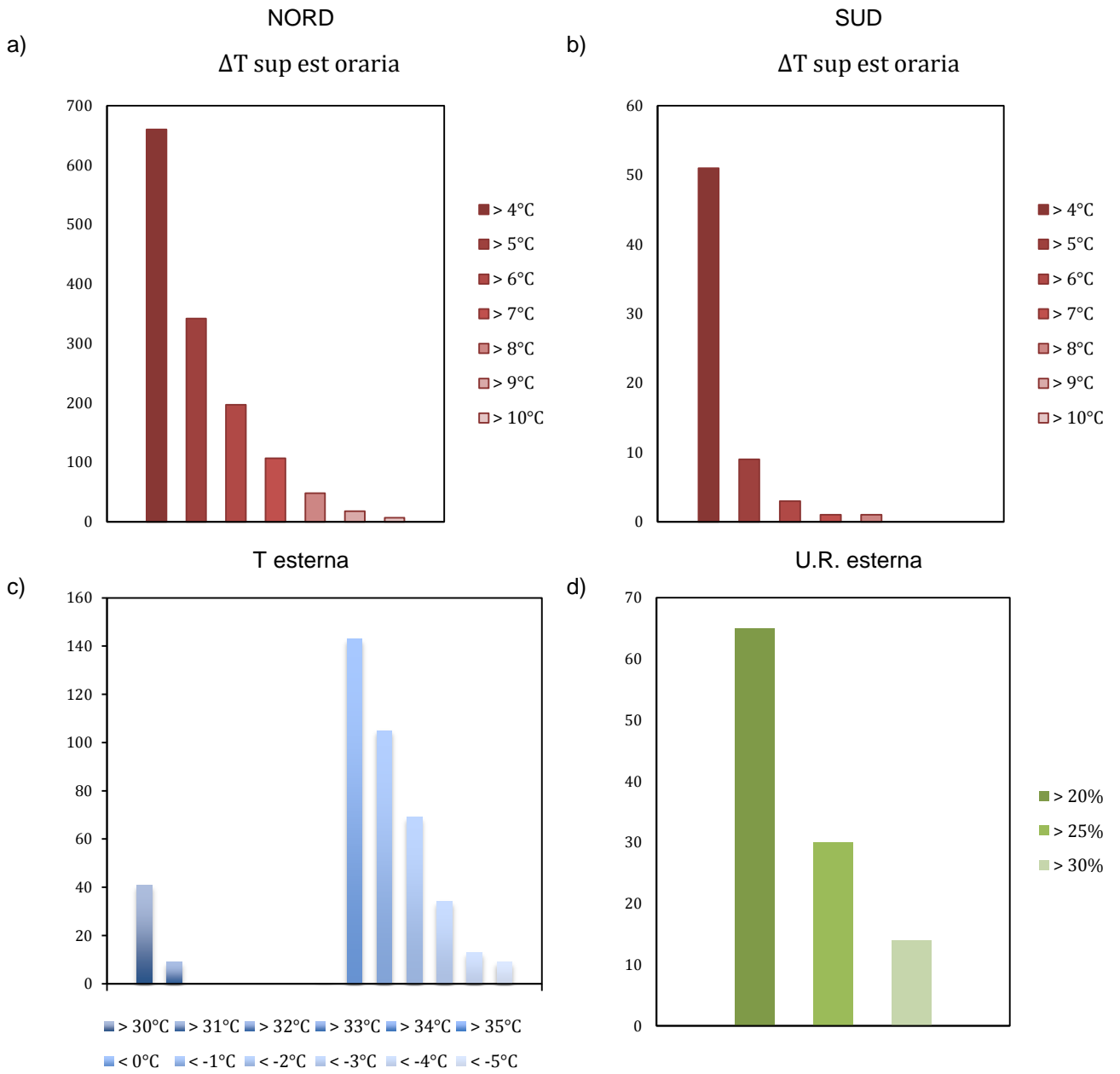
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

17\_Zurigo



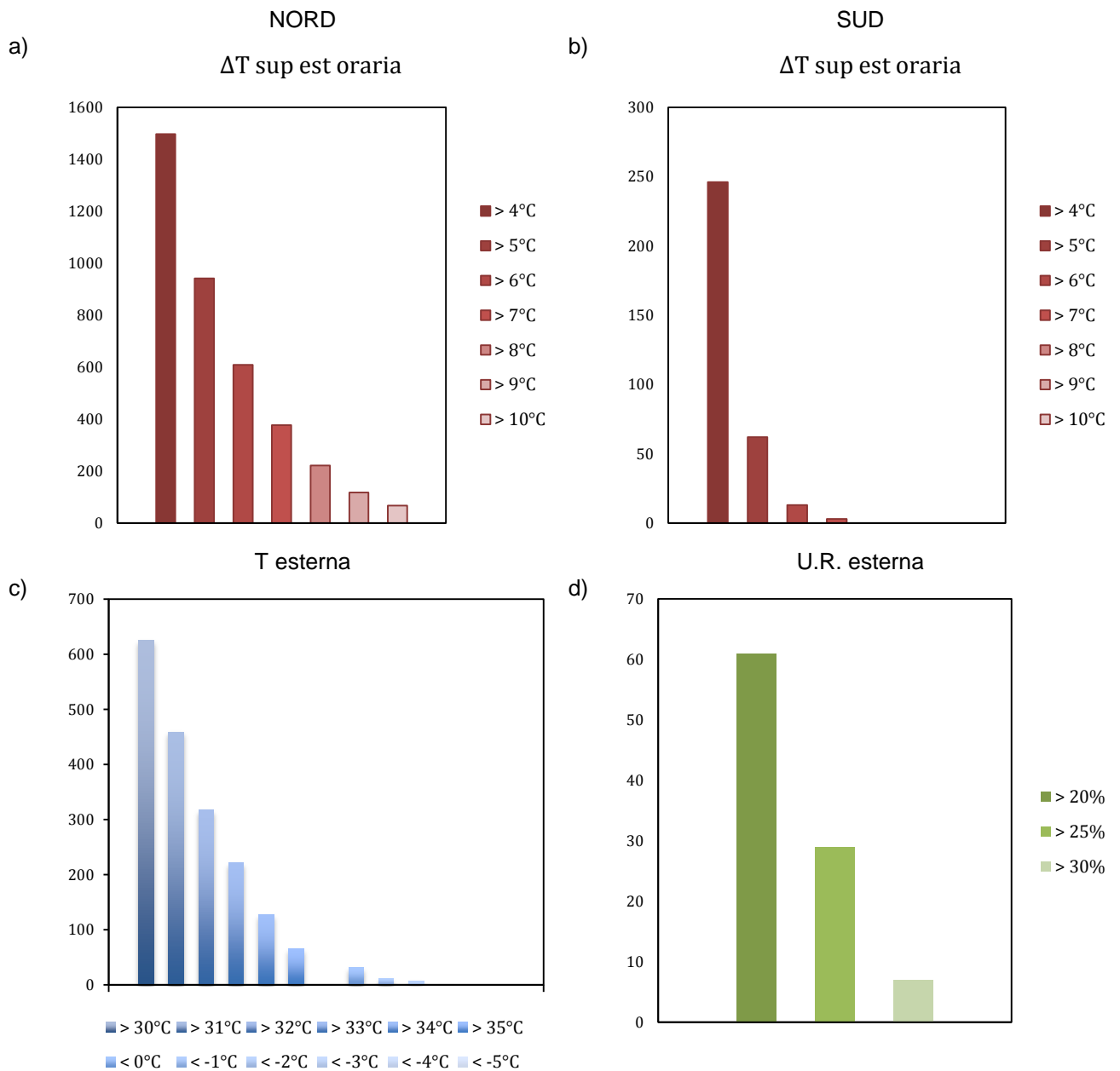


18\_Istanbul



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

19\_Smirne



**B.1 Seconda fase**

Francia : 1\_Marsiglia

Italia : 2\_Milano

3\_Palermo

4\_Roma

Portogallo : 5\_Lisbona

Spagna : 6\_Madrid

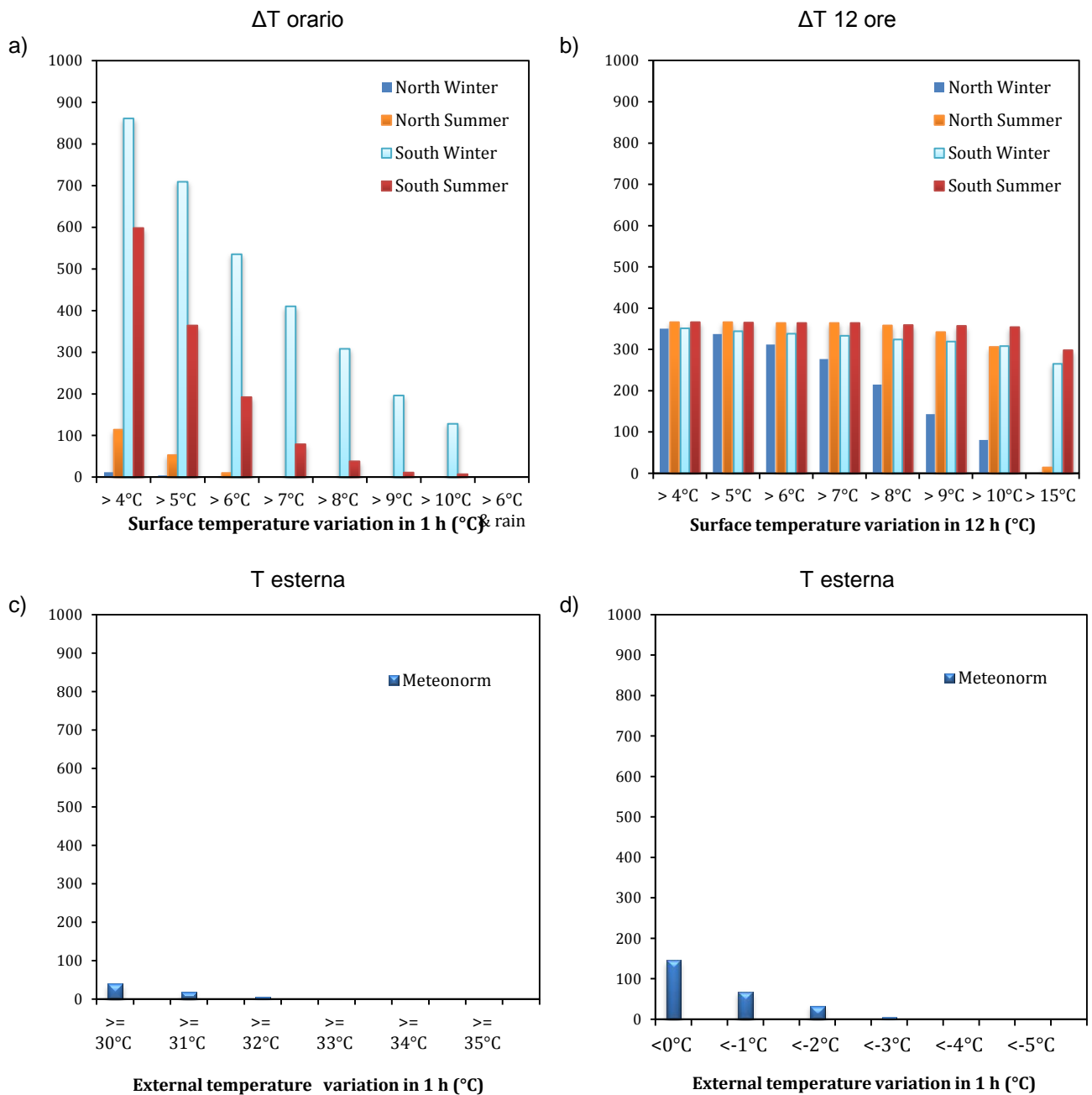
7\_Santander

Svizzera : 8\_Locarno

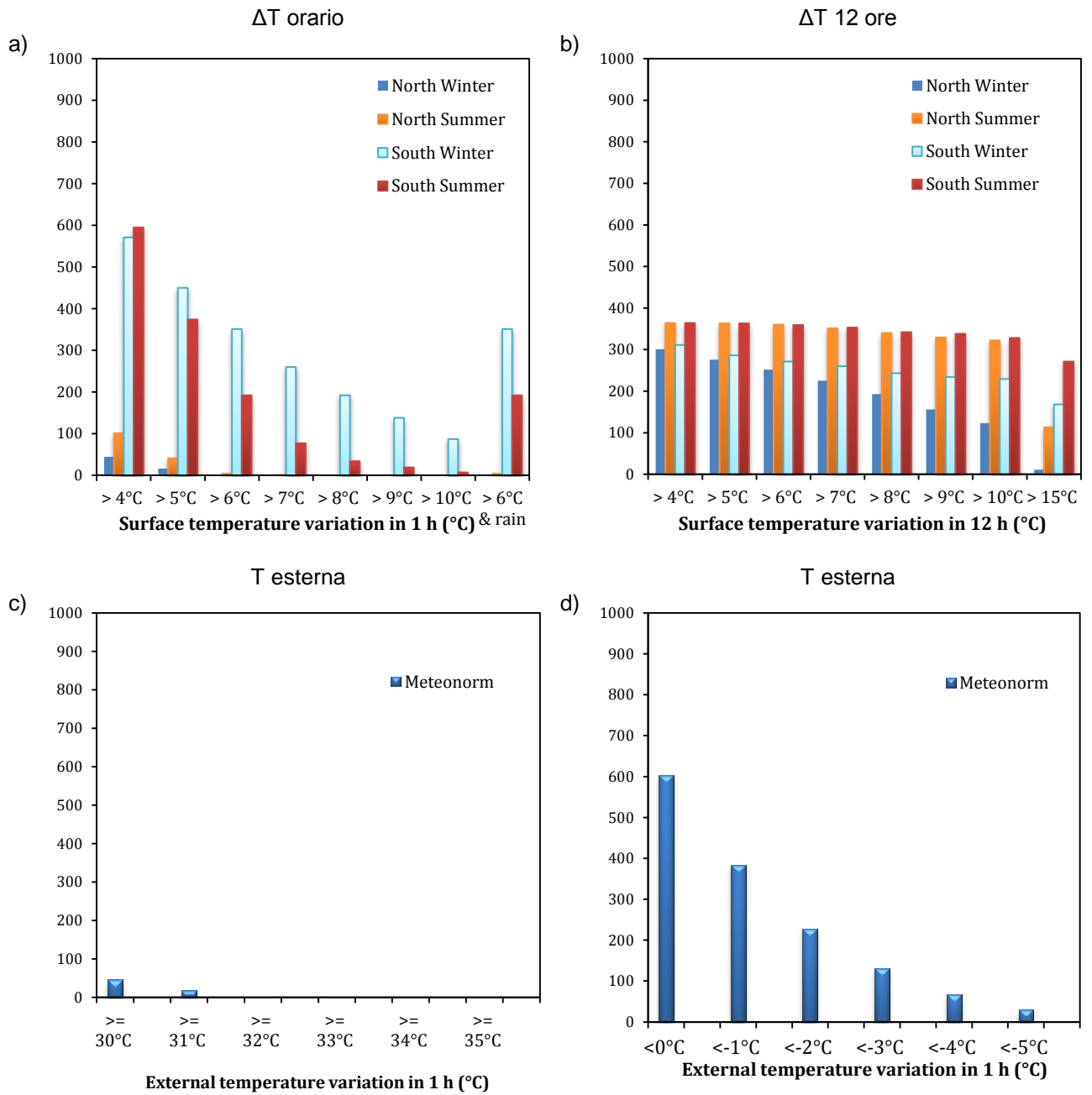
Turchia : 9\_Istanbul

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

1\_Marsiglia\_ ΔT

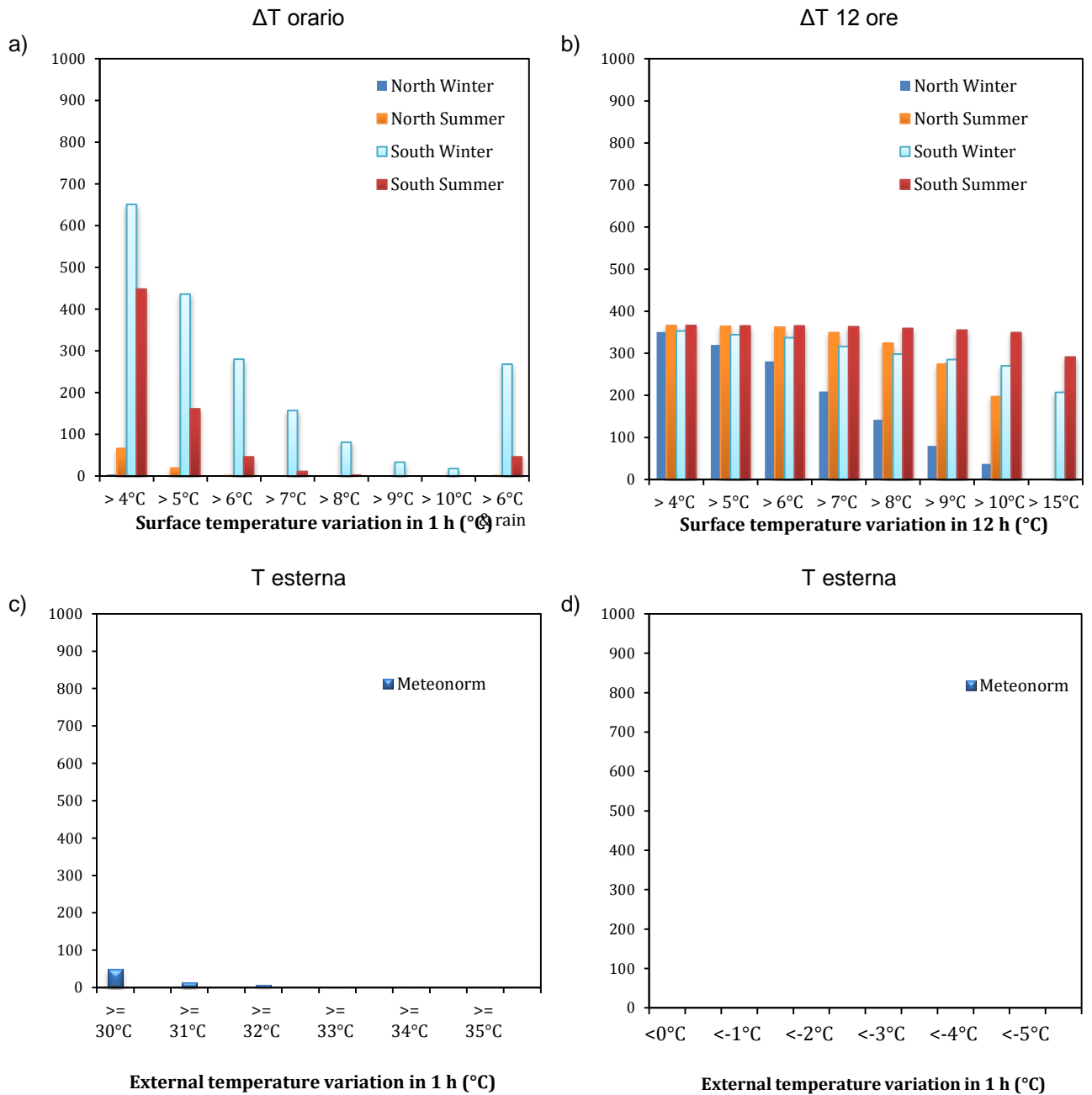


2\_Milano\_ΔT

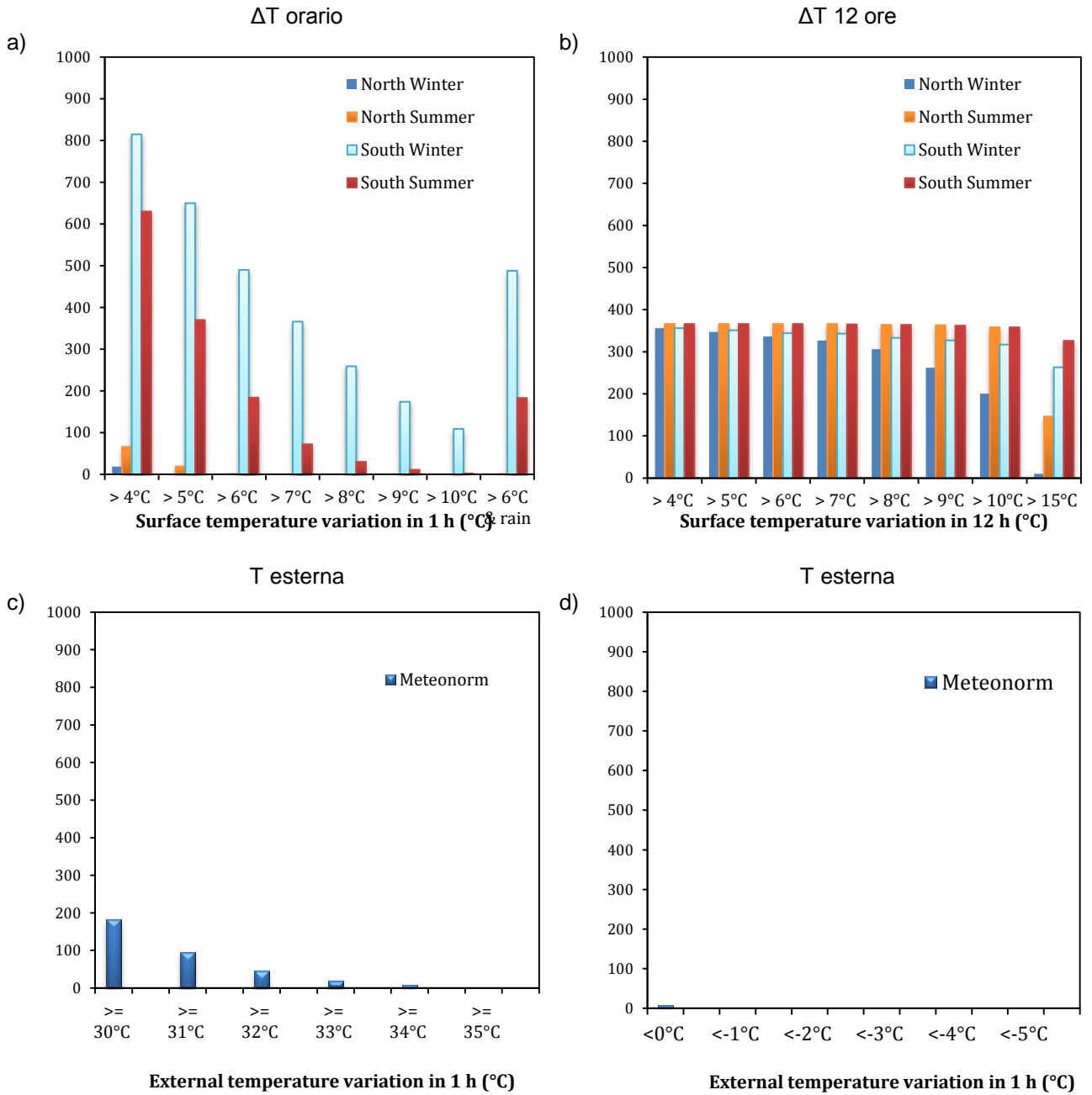


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

3\_Palermo\_ΔT

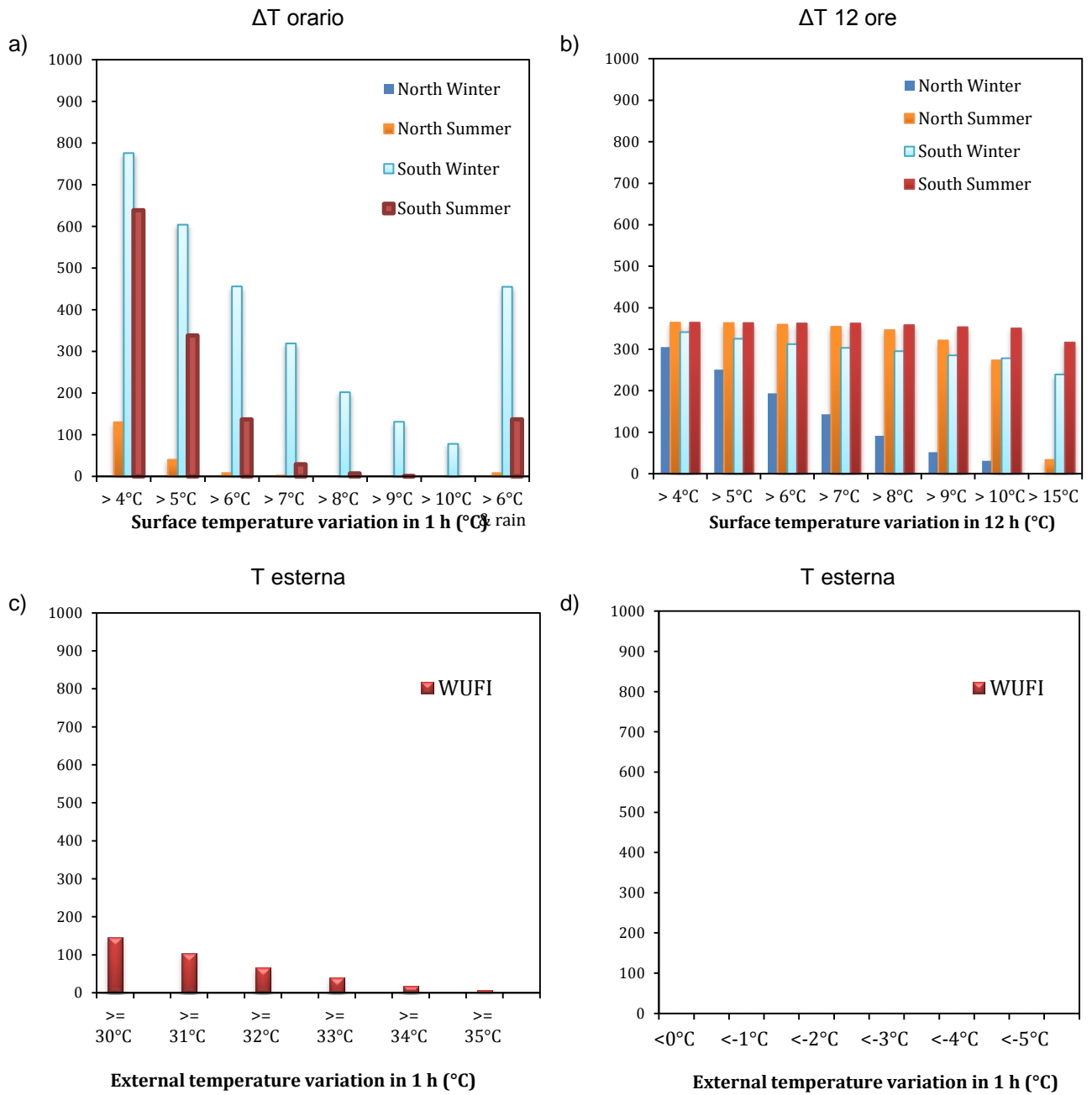


4\_Roma\_ΔT



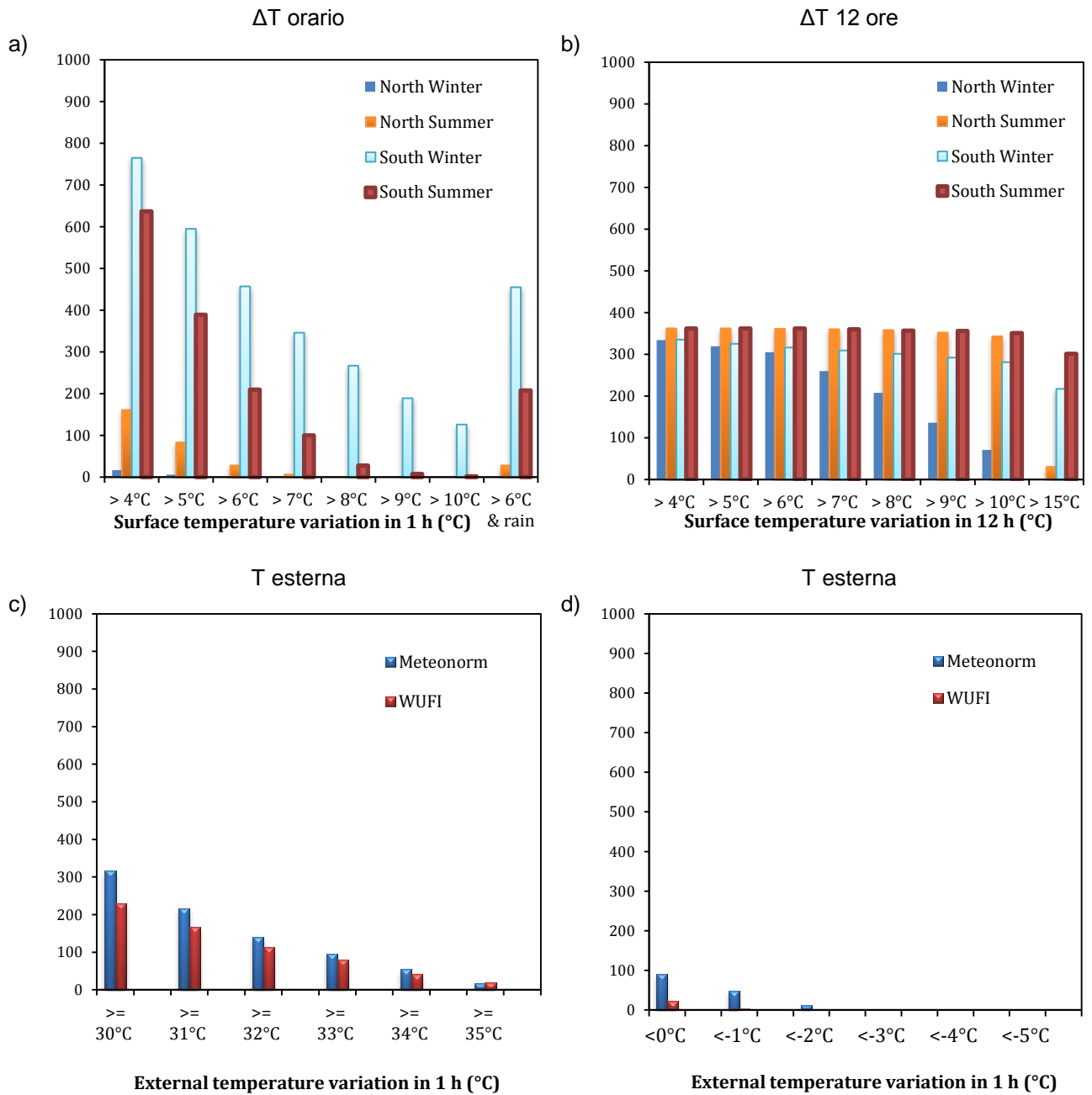
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

5\_Lisbona\_ΔT



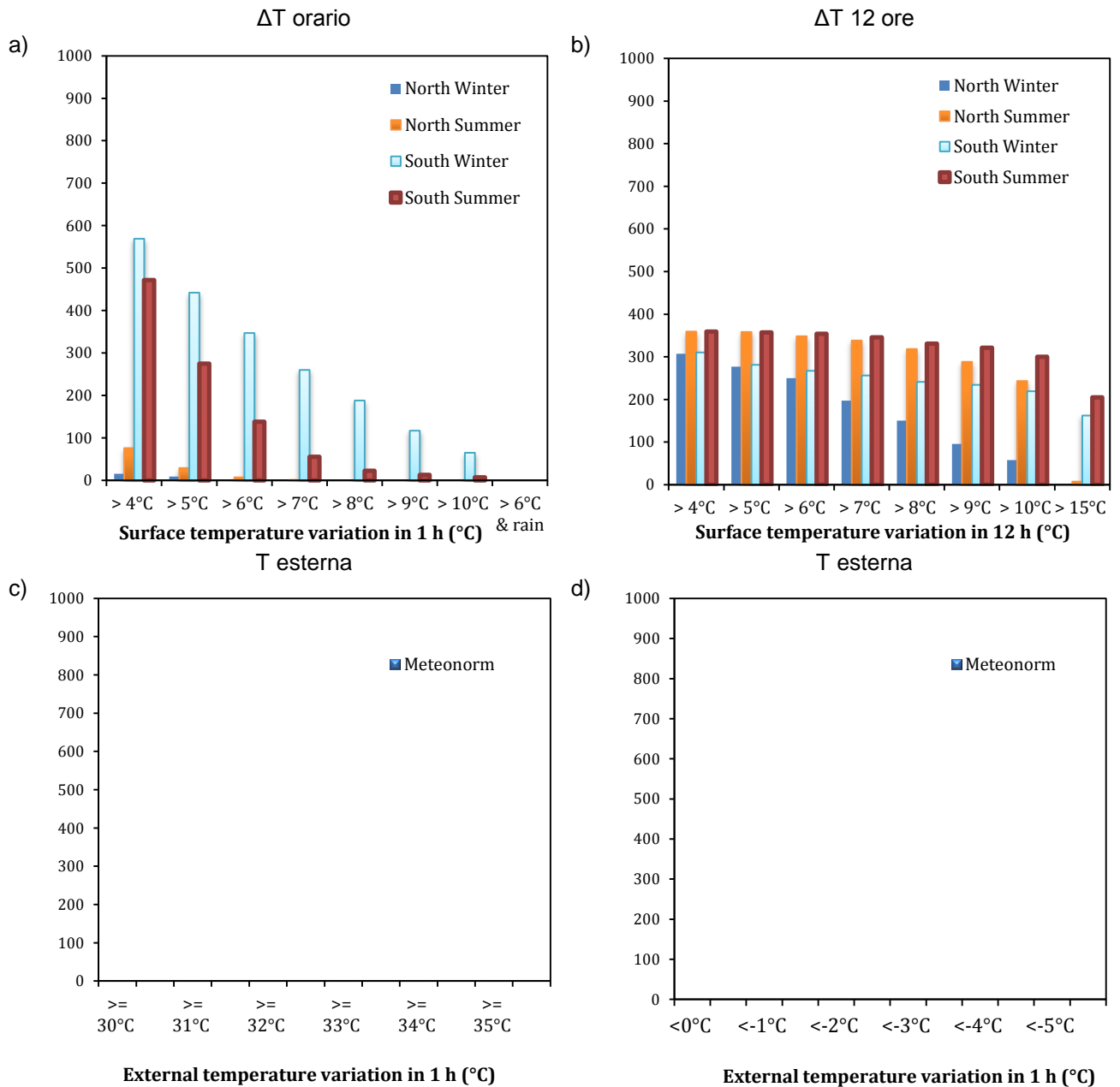


6\_Madrid\_ ΔT

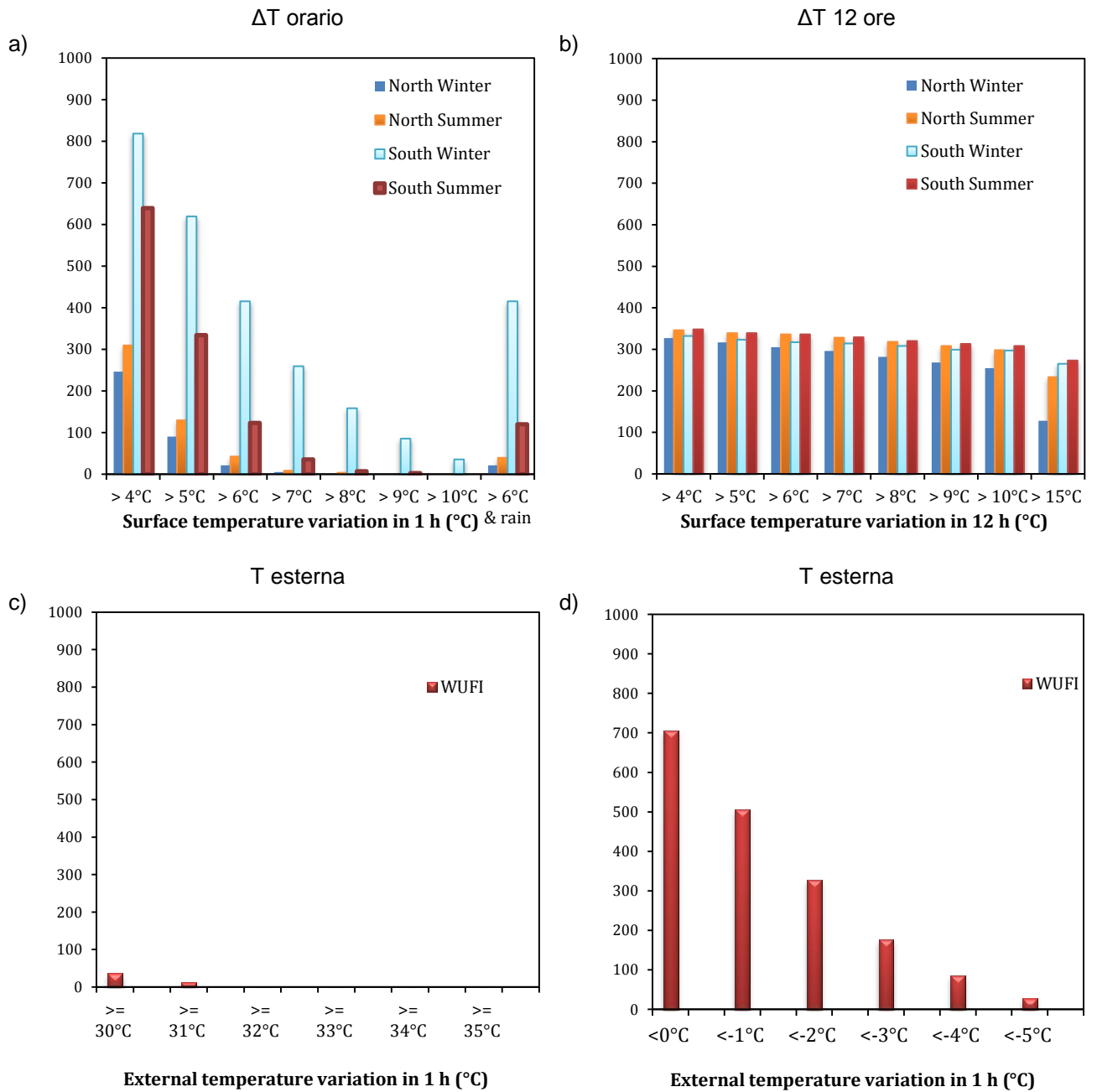


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

7\_Santander\_ΔT

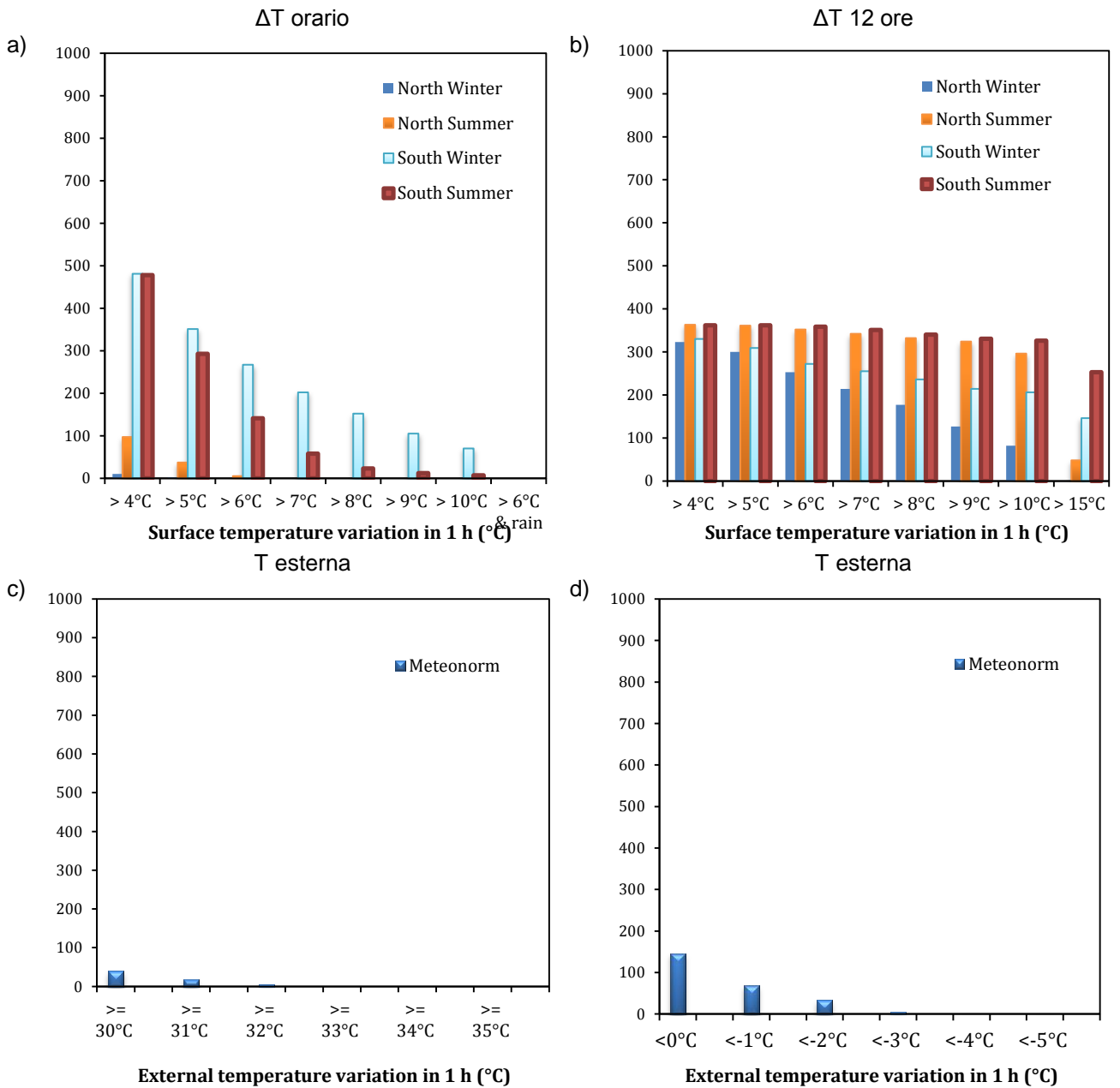


8\_Locarno\_ ΔT



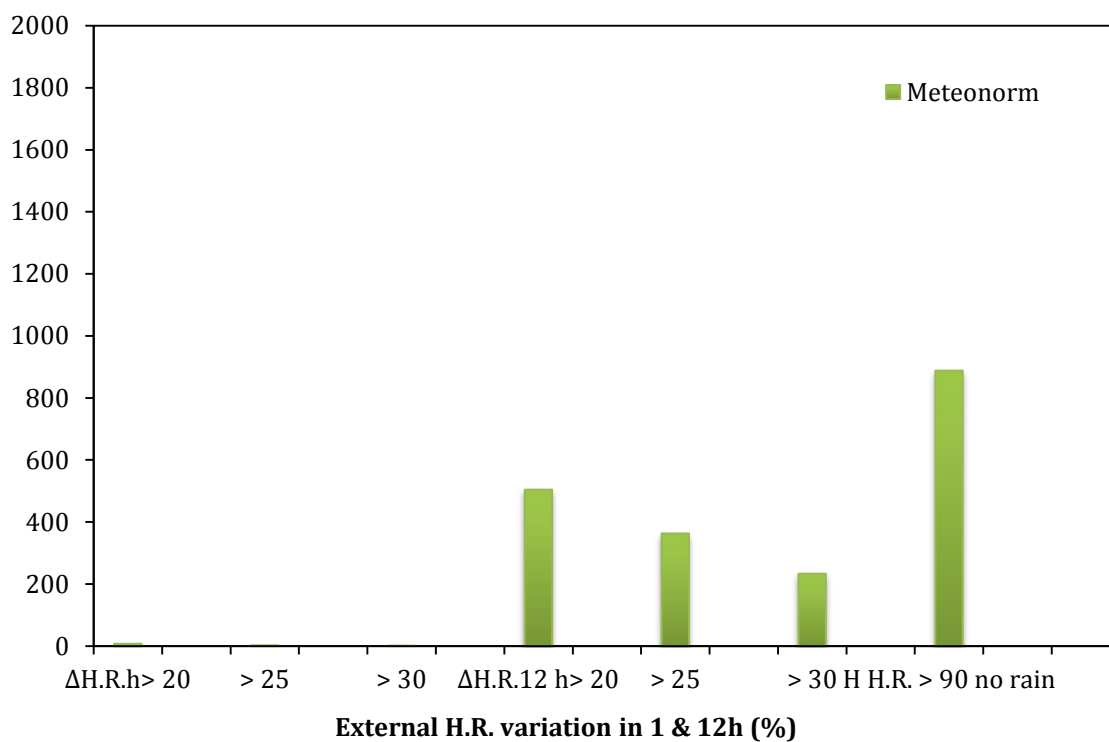
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

9\_Istanbul\_ΔT

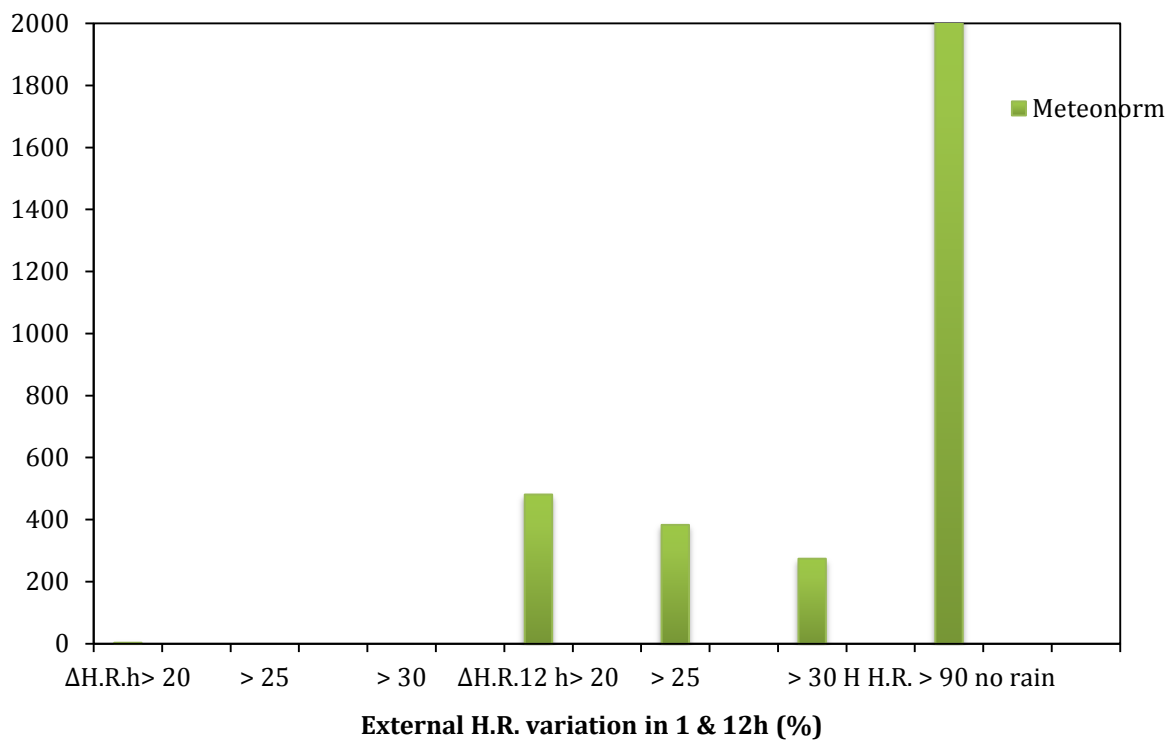


Allegato B

1\_Marsiglia\_U.R.

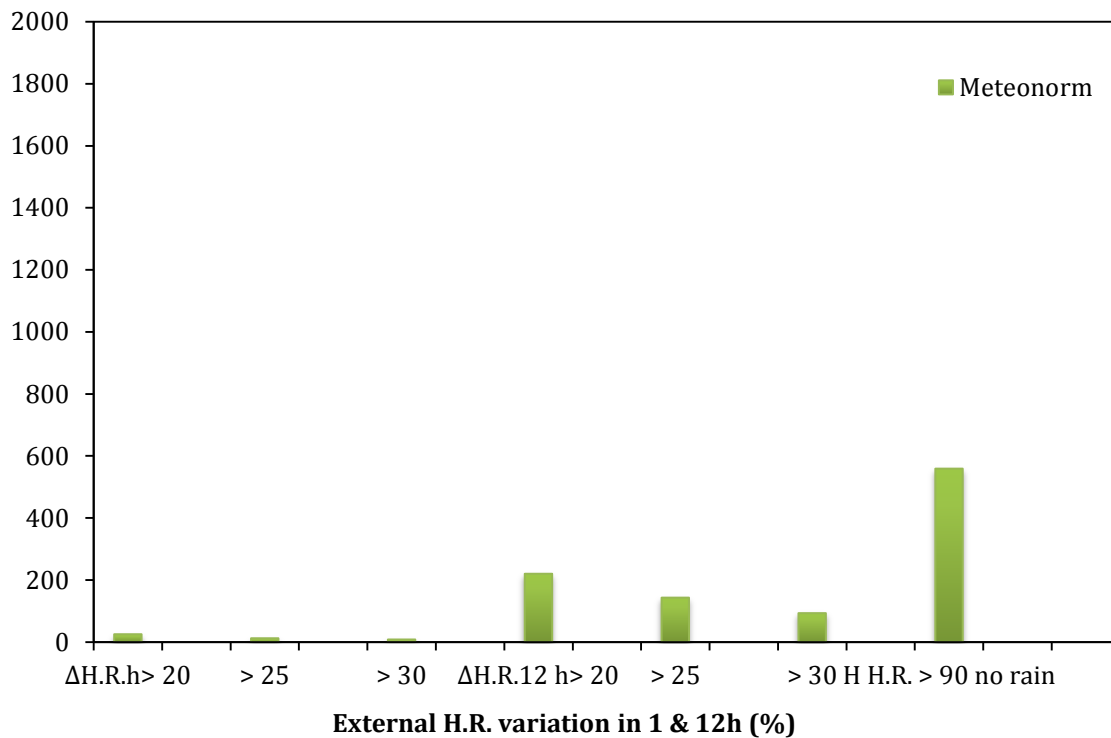


2\_Milano\_U.R.

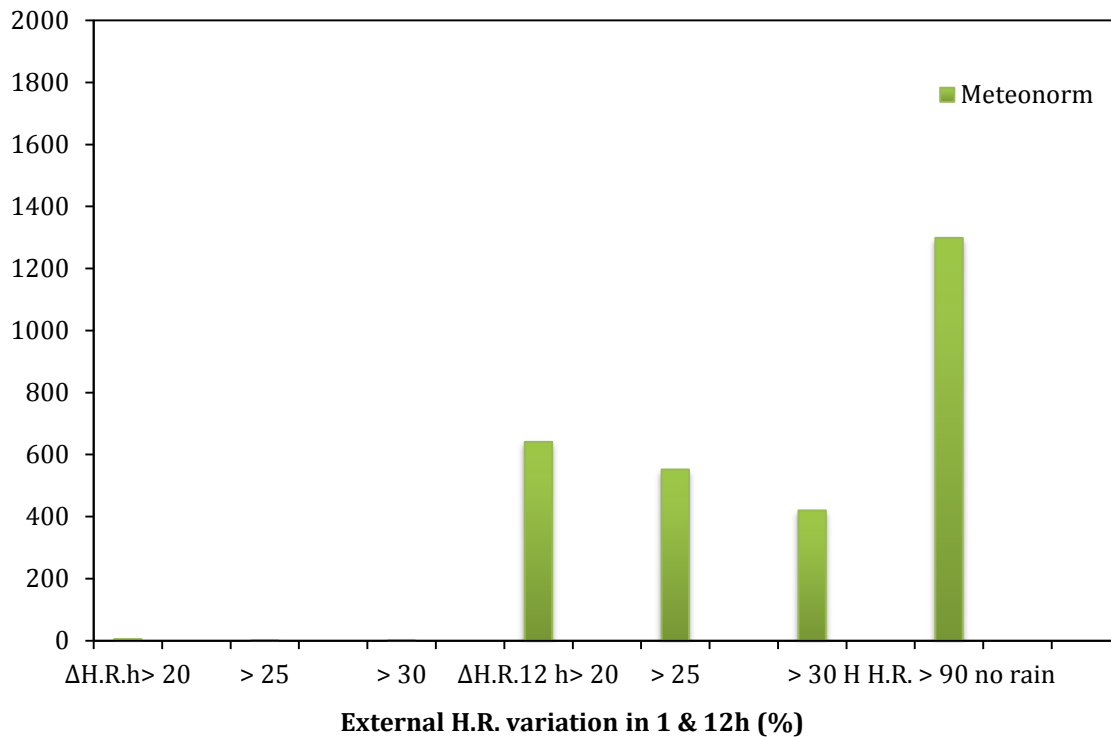


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

3\_Palermo\_U.R.

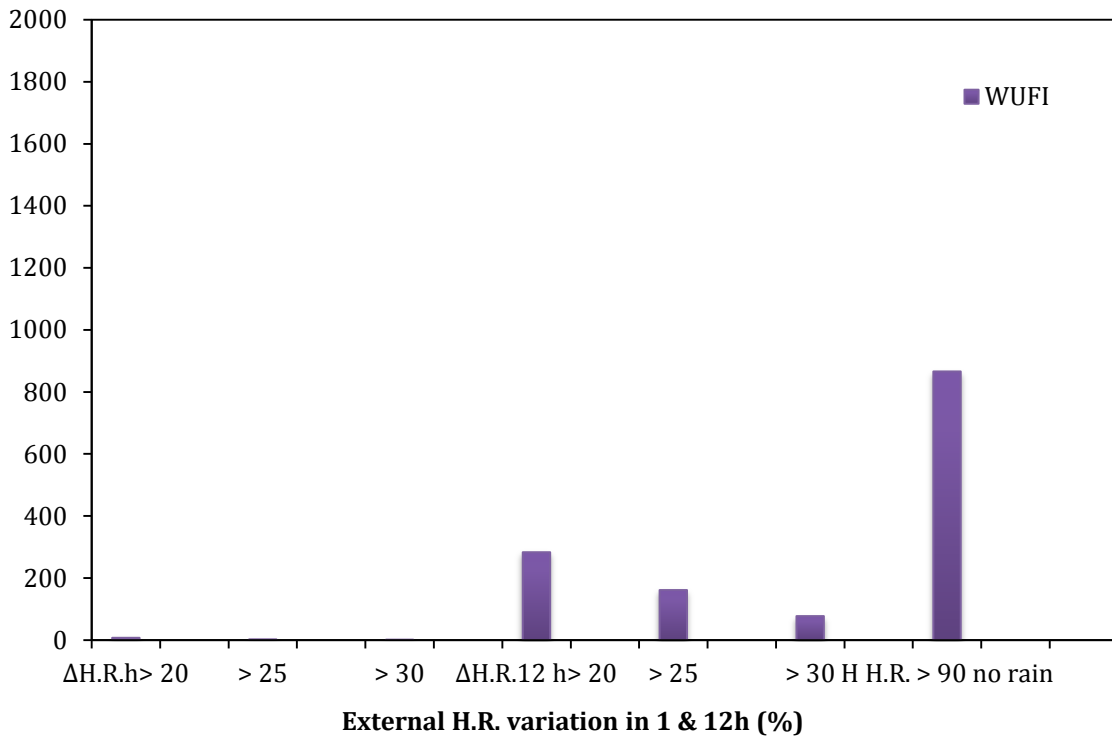


4\_Roma\_U.R.

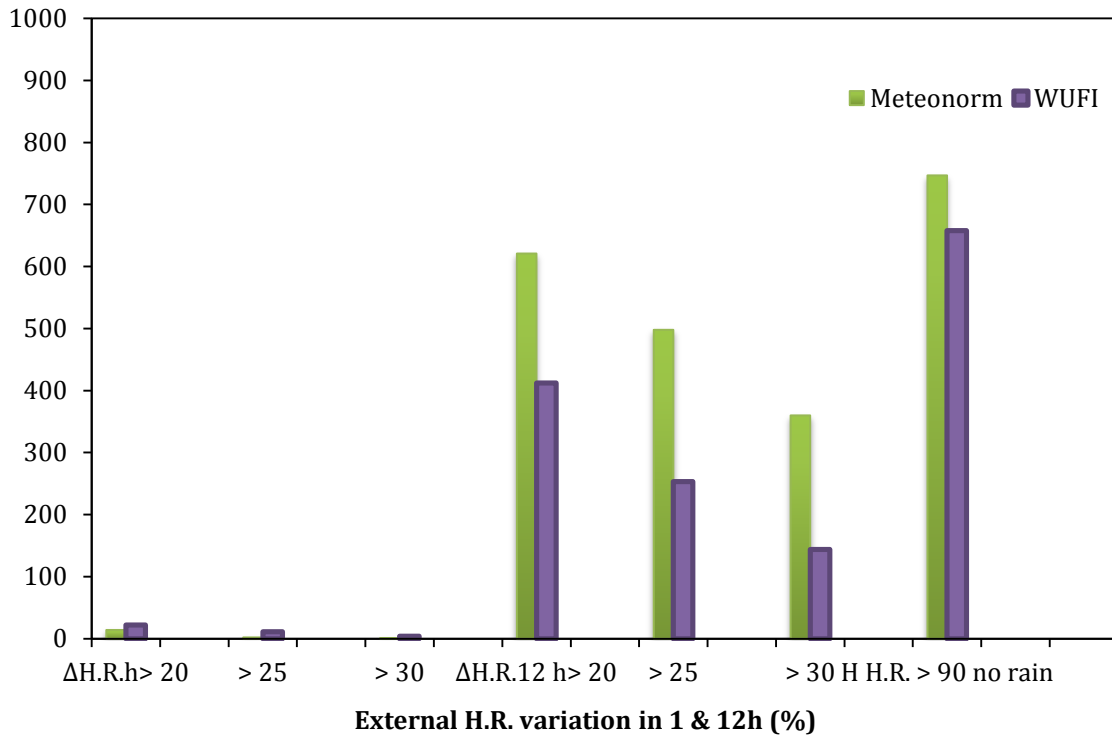


Allegato B

5\_Lisbona\_U.R.

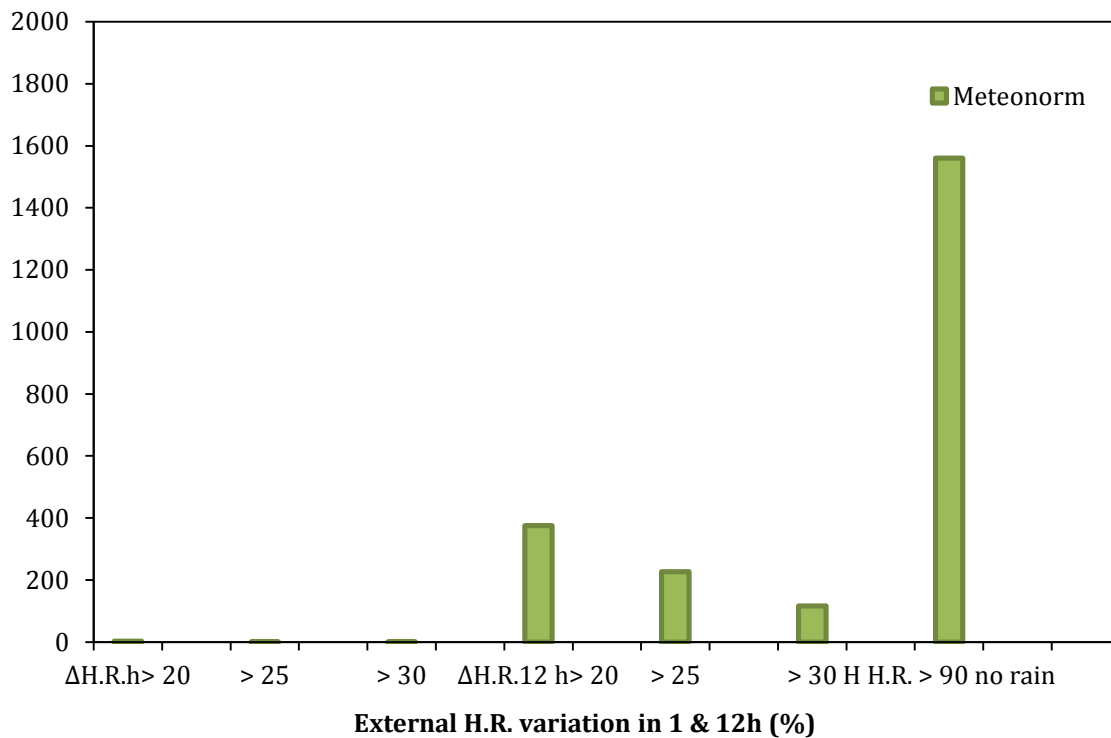


6\_Madrid\_U.R.

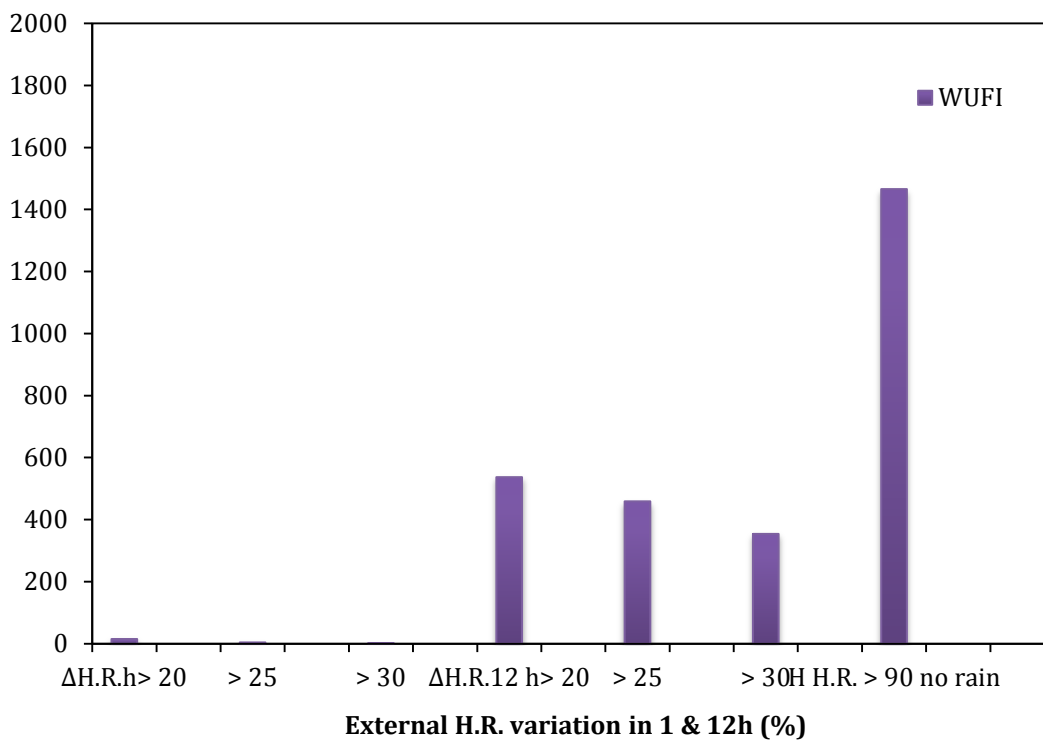


*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

7\_Santander\_U.R.



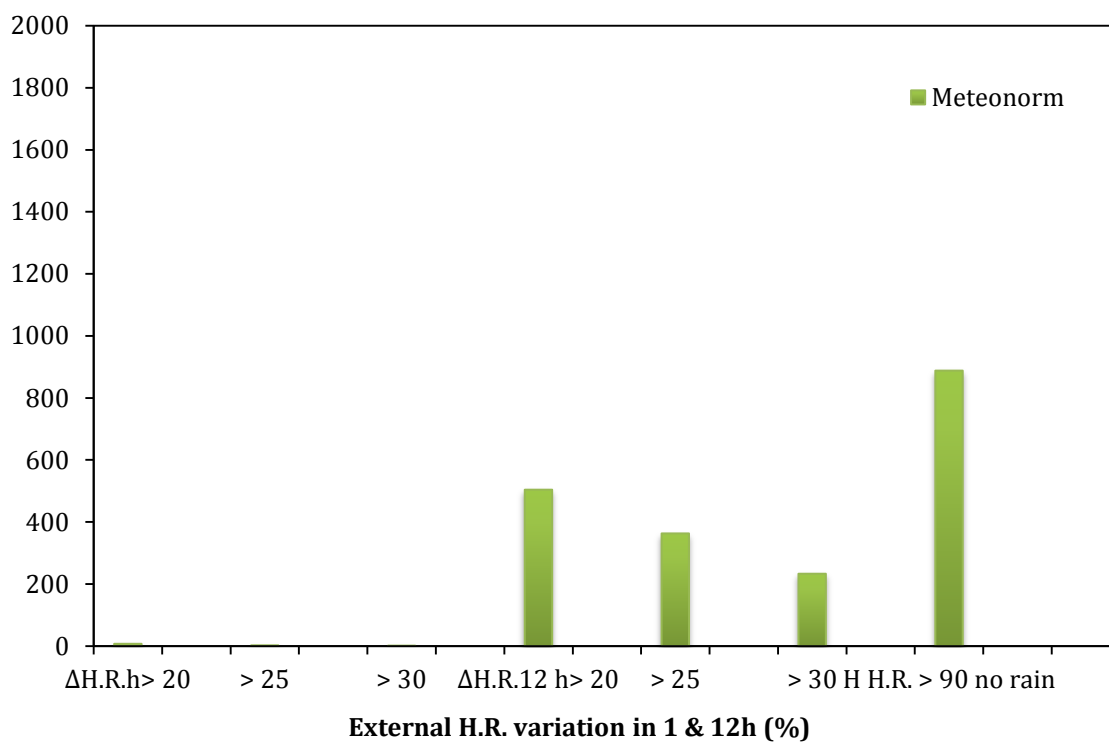
8\_Locarno\_U.R.





Allegato B

9\_Istanbul\_U.R.



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**B.2 Terza fase**

*B.2.1 MW*

Italia :           1\_Palermo  
                      2\_Roma

*B.2.2 EPS*

Italia :           3\_Palermo  
                      4\_Roma

Allegato B

B.2.1 MW: 1\_Palermo

$\Delta T$

h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	1	9	58	128	225	329	577
≥ 5	0	0	0	1	8	42	92	161	304
≥ 6	0	0	0	0	1	6	29	69	179
≥ 7	0	0	0	0	0	1	5	27	94
≥ 8	0	0	0	0	0	0	1	4	46
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	1	16
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	4

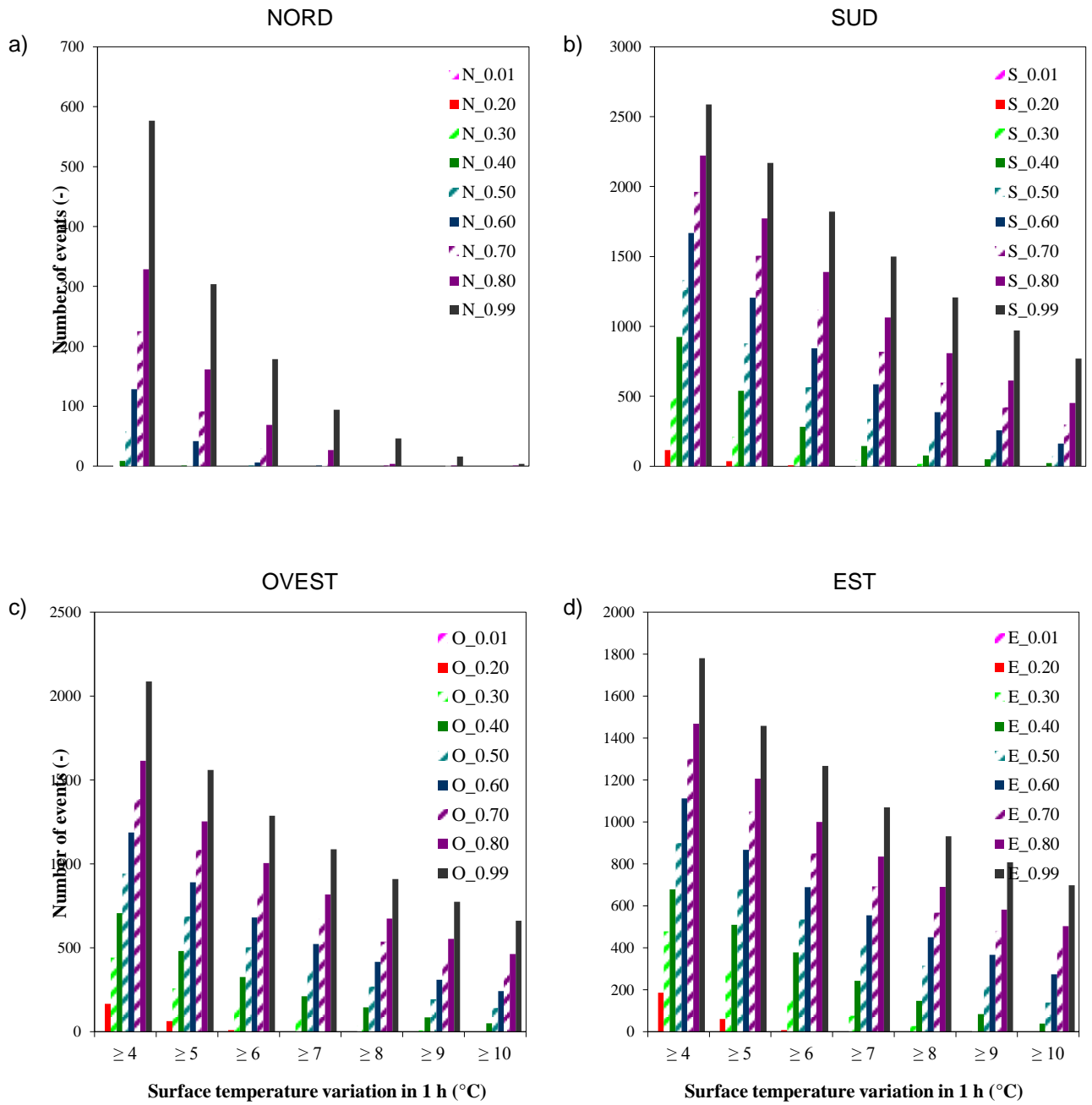
h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	115	490	925	1332	1668	1962	2222	2587
≥ 5	0	36	210	540	878	1205	1506	1772	2168
≥ 6	0	8	87	282	564	843	1121	1390	1820
≥ 7	0	0	46	144	337	586	819	1063	1500
≥ 8	0	0	16	77	206	387	597	808	1208
≥ 9	0	0	4	50	118	257	421	614	972
≥ 10	0	0	0	23	73	161	298	452	770

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	166	442	706	941	1187	1393	1615	2087
≥ 5	0	63	258	480	687	891	1084	1253	1560
≥ 6	0	10	149	325	504	680	840	1005	1287
≥ 7	0	0	76	211	377	522	675	817	1086
≥ 8	0	0	35	144	269	415	537	674	909
≥ 9	0	0	7	86	194	309	436	553	774
≥ 10	0	0	0	49	142	242	348	463	661

h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	185	478	678	899	1112	1301	1468	1780
≥ 5	0	60	310	510	680	867	1050	1206	1458
≥ 6	0	8	163	378	525	688	849.67	1000	1267
≥ 7	0	0	76	243	421	555	693	835	1069
≥ 8	0	0	27	147	314	450	58	690	931
≥ 9	0	0	6	84	218	367	482	582	808
≥ 10	0	0	0	38	140	273	403	503	698

Allegato B



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**ΔT e Pioggia**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	1	1	7	14	21	27	38
≥ 5	0	0	0	1	1	5	11	19	28
≥ 6	0	0	0	0	1	1	4	9	19
≥ 7	0	0	0	0	0	1	1	4	13
≥ 8	0	0	0	0	0	0	1	1	6
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	1	3
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	1

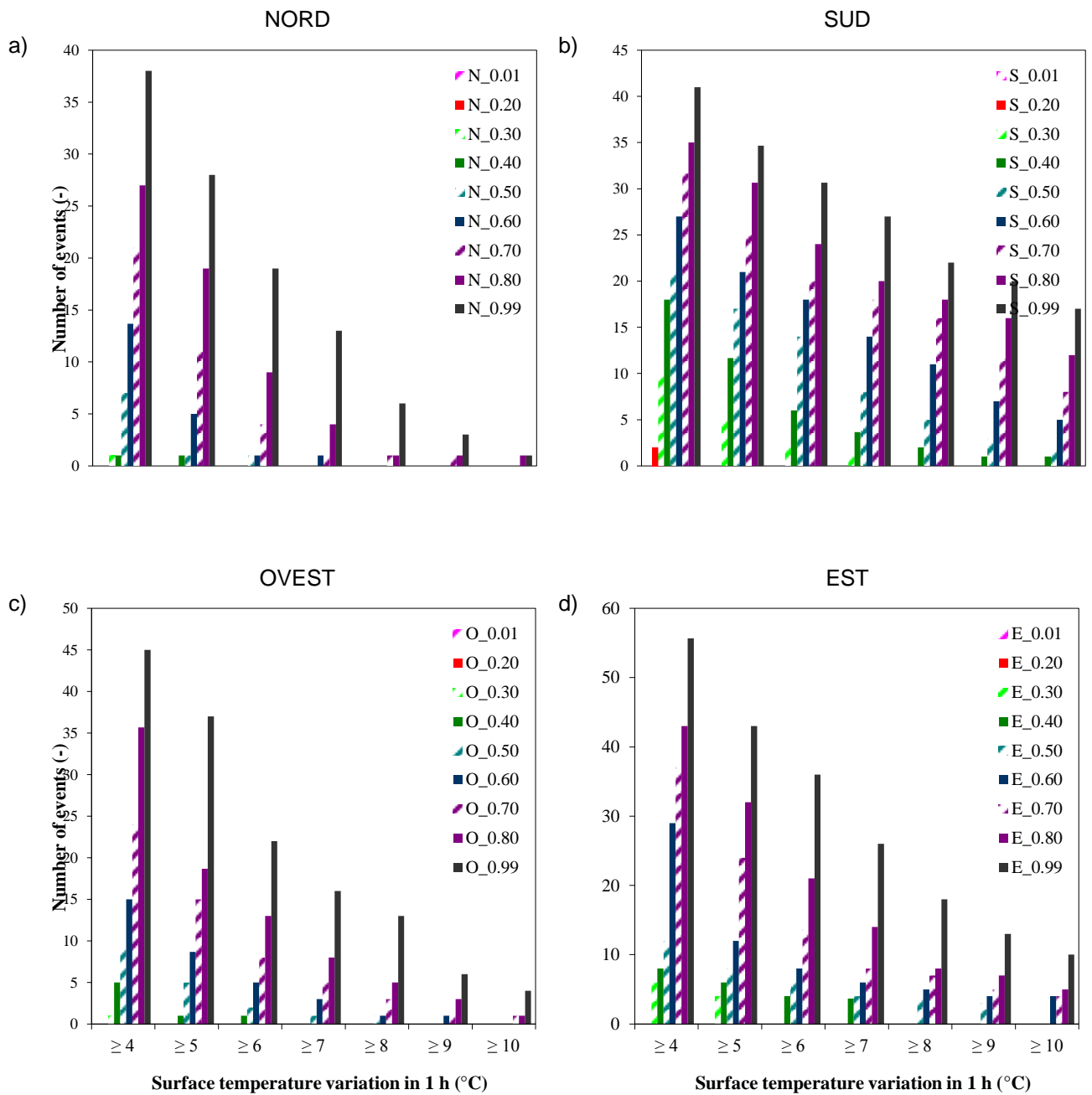
h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	2	10	18	21	27	32	35	41
≥ 5	0	0	5	12	17	21	25	31	35
≥ 6	0	0	2	6	14	18	20	24	31
≥ 7	0	0	1	4	8	14	18	20	27
≥ 8	0	0	0	2	5	11	16	18	22
≥ 9	0	0	0	1	3	7	12	16	20
≥ 10	0	0	0	1	2	5	8	12	17

Allegato B

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	1	5	9	15	24	36	45
≥ 5	0	0	0	1	5	9	15	19	37
≥ 6	0	0	0	1	2	5	8	13	22
≥ 7	0	0	0	0	1	3	5	8	16
≥ 8	0	0	0	0	1	1	3	5	13
≥ 9	0	0	0	0	0	1	1	3	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	1	4

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	6	8	12	29	37	43	56
≥ 5	0	0	4	6	8	12	24	32	43
≥ 6	0	0	0	4	6	8	14	21	36
≥ 7	0	0	0	4	4	6	8	14	26
≥ 8	0	0	0	0	4	5	7	8	18
≥ 9	0	0	0	0	3	4	5	7	13
≥ 10	0	0	0	0	0	4	4	5	10

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*





Allegato B

**ΔT e Pioggia e Estate**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	1	1	3	6	9	10	13
≥ 5	0	0	0	1	1	2	4	8	11
≥ 6	0	0	0	0	1	1	2	3	8
≥ 7	0	0	0	0	0	1	1	2	4
≥ 8	0	0	0	0	0	0	1	1	3
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	1	2
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	1

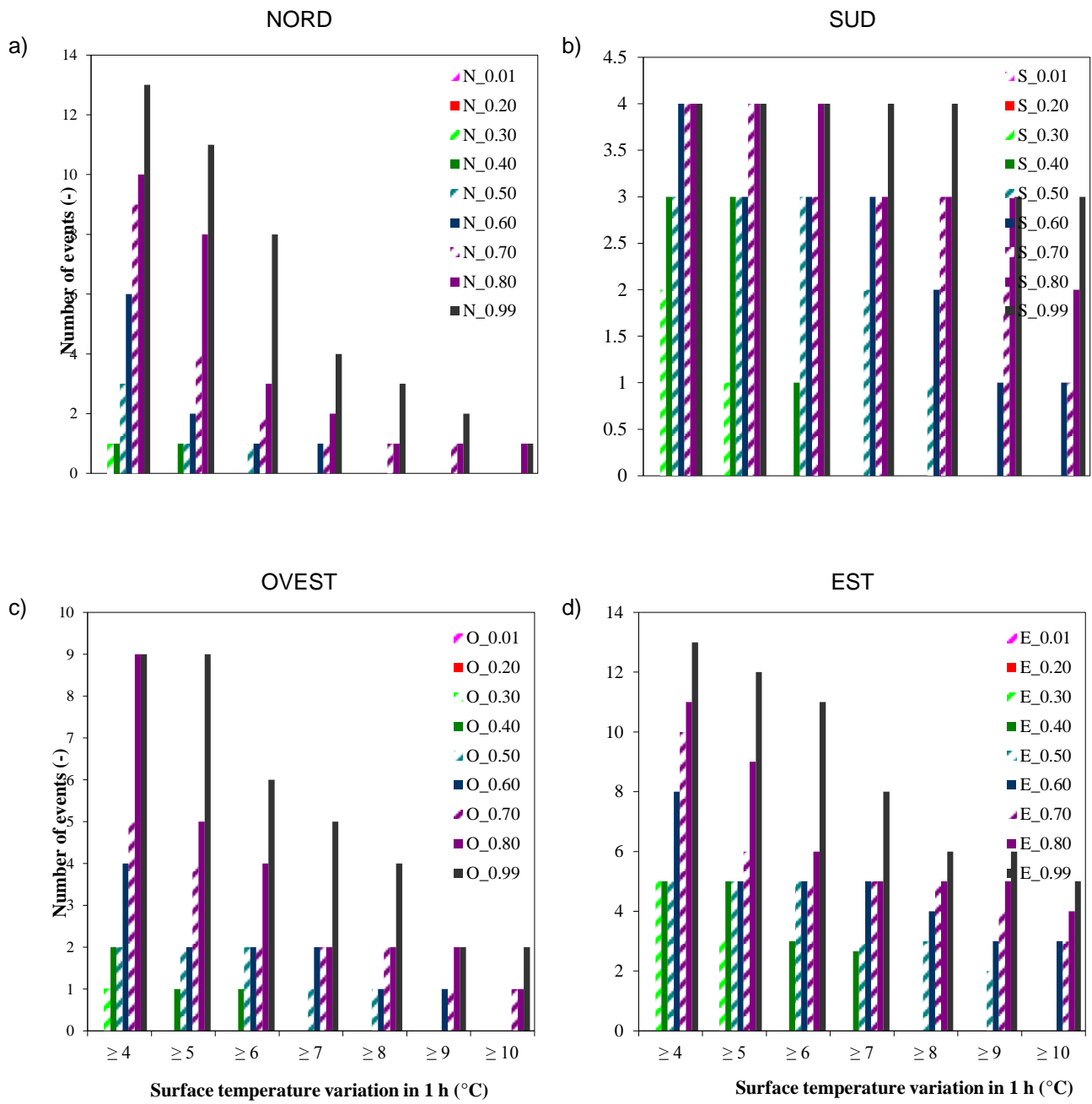
h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	0	2	3	3	4	4	4	4
≥ 5	0	0	1	3	3	3	4	4	4
≥ 6	0	0	0	1	3	3	3	4	4
≥ 7	0	0	0	0	2	3	3	3	4
≥ 8	0	0	0	0	1	2	3	3	4
≥ 9	0	0	0	0	0	1	2	3	3
≥ 10	0	0	0	0	0	1	1	2	3

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	1	2	2	4	5	9	9
≥ 5	0	0	0	1	2	2	4	5	9
≥ 6	0	0	0	1	2	2	2	4	6
≥ 7	0	0	0	0	1	2	2	2	5
≥ 8	0	0	0	0	1	1	2	2	4
≥ 9	0	0	0	0	0	1	1	2	2
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	1	2

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	5	5	5	8	10	11	13
≥ 5	0	0	3	5	5	5	6	9	12
≥ 6	0	0	0	3	5	5	5	6	11
≥ 7	0	0	0	3	3	5	5	5	8
≥ 8	0	0	0	0	3	4	5	5	6
≥ 9	0	0	0	0	2	3	4	5	6
≥ 10	0	0	0	0	0	3	3	4	5

Allegato B



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**$\Delta T$  e Pioggia e Temperatura Superficiale  $\geq 40^\circ\text{C}$**

h/anno Limiti	Palermo_ $\Delta T$ & Pioggia & T sup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	0	0	4
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	0	0	3
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	1

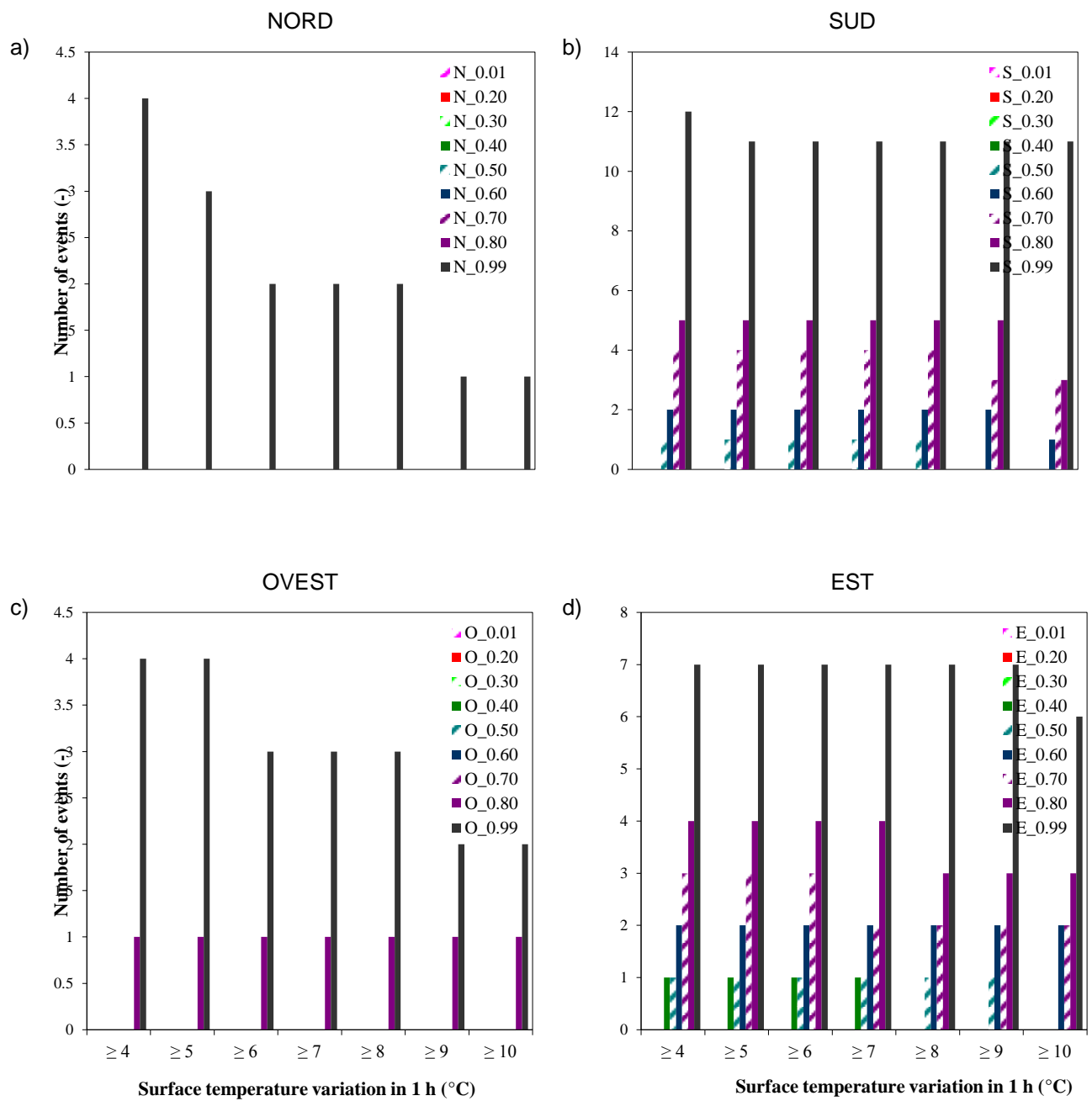
h/anno Limiti	Palermo_ $\Delta T$ & Pioggia & T sup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	1	2	4	5	12
$\geq 5$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 6$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 7$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 8$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 9$	0	0	0	0	0	2	3	5	11
$\geq 10$	0	0	0	0	0	1	3	3	11

Allegato B

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&T sup ≥ 40°C								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	0	0	0	0	0	1	4
≥ 5	0	0	0	0	0	0	0	1	4
≥ 6	0	0	0	0	0	0	0	1	3
≥ 7	0	0	0	0	0	0	0	1	3
≥ 8	0	0	0	0	0	0	0	1	3
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	1	2
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	2

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&T sup ≥ 40°C								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	0	1	1	2	3	4	7
≥ 5	0	0	0	1	1	2	3	4	7
≥ 6	0	0	0	1	1	2	3	4	7
≥ 7	0	0	0	1	1	2	2	4	7
≥ 8	0	0	0	0	1	2	2	3	7
≥ 9	0	0	0	0	1	2	2	3	7
≥ 10	0	0	0	0	0	2	2	3	6

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



Allegato B

**ΔT Classi di temperature**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classe di temperature								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5 - 10	497	445	424	417	414	405	398	388	380
10 - 15	2485	2286	2195	2113	2040	1991	1937	1897	1842
15 - 20	2517	2474	2430	2376	2299	2200	2126	2068	1939
20 - 25	2126	2079	2066	2049	2037	2048	2041	2028	1965
25 - 30	1021	1202	1223	1218	1224	1213	1195	1176	1159
30 - 35	110	259	390	539	653	724	772	762	776
35 - 40	0	11	28	45	90	172	264	390	548
40 - 45	0	0	0	0	0	4	24	47	136
45 - 50	0	0	0	0	0	0	0	0	12
50 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 - 70	0	0	0	0	0	0	0	0	0

h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classe di temperature								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
5 - 10	458	382	363	352	348	338	334	329	322
10 - 15	2452	1978	1885	1824	1772	1729	1698	1678	1640
15 - 20	2526	2193	2029	1887	1798	1741	1702	1651	1594
20 - 25	2165	2206	2070	1941	1841	1769	1684	1638	1553
25 - 30	1041	1295	1299	1199	1111	1055	1034	980	893
30 - 35	114	589	741	818	779	680	590	568	573
35 - 40	0	109	303	501	570	616	576	491	394
40 - 45	0	5	66	191	358	422	487	509	410
45 - 50	0	0	0	42	143	261	322	385	431
50 - 55	0	0	0	0	35	113	195	239	334
55 - 60	0	0	0	0	0	32	95	163	243
60 - 65	0	0	0	0	0	1	36	87	139
65 - 70	0	0	0	0	0	0	3	33	123

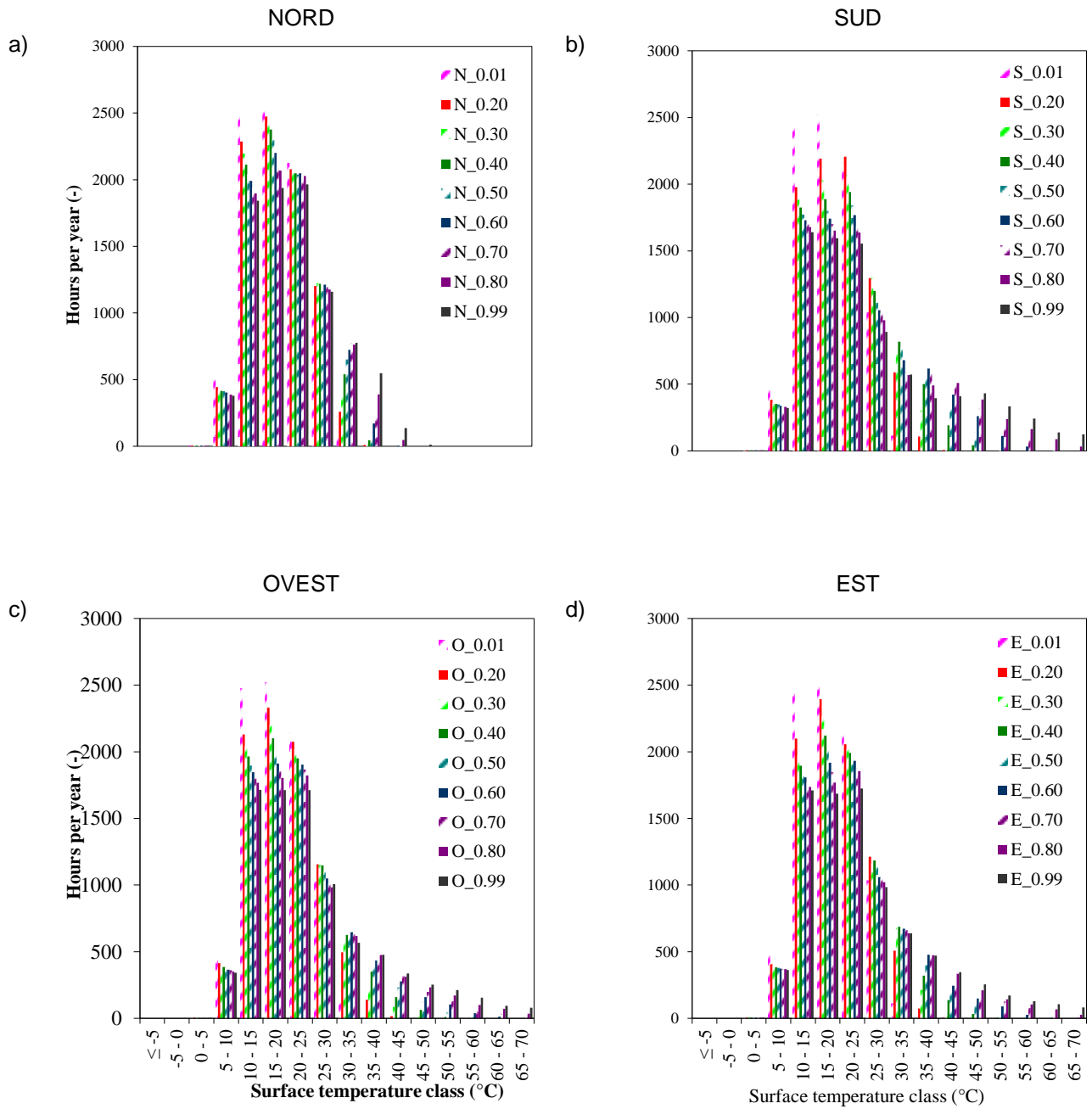
*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classi di temperature								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	4	4	4	3	3	3	3	3	3
5 - 10	474	415	394	385	372	366	361	351	342
10 - 15	2476	2129	2045	1964	1896	1874	1799	1766	1714
15 - 20	2523	2332	2201	2101	2012	1911	1854	1804	1712
20 - 25	2141	2075	2020	1950	1909	1904	1867	1822	1713
25 - 30	1028	1155	1152	1147	1105	1051	1012	983	1007
30 - 35	115	496	593	626	643	647	633	617	566
35 - 40	0	139	254	351	402	434	448	476	478
40 - 45	0	16	87	159	233	278	321	312	337
45 - 50	0	0	10	64	124	160	198	233	253
50 - 55	0	0	1	11	48	105	129	171	213
55 - 60	0	0	0	1	11	40	87	101	156
60 - 65	0	0	0	0	1	12	35	72	95
65 - 70	0	0	0	0	0	2	10	35	80

h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classe di temperature								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5 - 10	481	406	394	384	379	372	370	370	363
10 - 15	2474	2099	1972	1894	1841	1807	1772	1736	1710
15 - 20	2510	2394	2270	2121	2010	1917	1848	1768	1686
20 - 25	2142	2055	2019	1990	1956	1933	1878	1855	1724
25 - 30	1036	1213	1162	1184	1135	1061	1049	1020	985
30 - 35	112	509	679	687	693	673	662	639	637
35 - 40	0	74	214	3221	401	478	483	473	471
40 - 45	0	5	42	136	198	245	277	335	347
45 - 50	0	0	4	33	108	148	179	211	255
50 - 55	0	0	0	4	31	90	126	142	172
55 - 60	0	0	0	0	4	28	77	105	128
60 - 65	0	0	0	0	0	4	28	67	106
65 - 70	0	0	0	0	0	0	5	27	82



*Allegato B*



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

2\_Roma

**ΔT**

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	3	44	140	284	474	690	1153
≥ 5	0	0	0	6	33	84	175	287	559
≥ 6	0	0	0	0	8	29	60	121	273
≥ 7	0	0	0	0	0	8	27	55	151
≥ 8	0	0	0	0	0	1	9	24	75
≥ 9	0	0	0	0	0	0	2	9	42
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	4	20

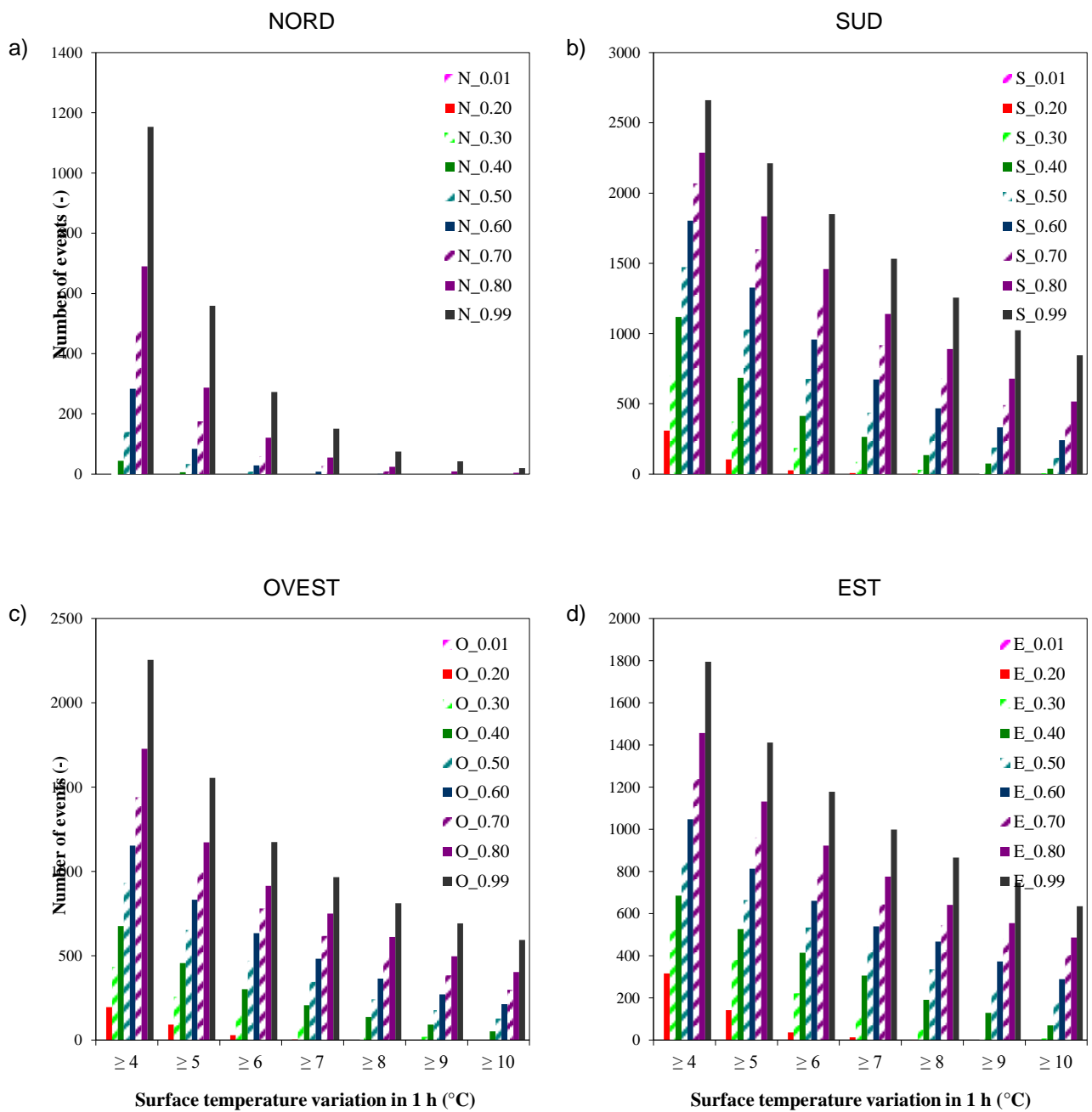
h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	309	702	1119	1472	1804	2070	2287	2662
≥ 5	0	103	372	685	1028	1327	1601	1835	2212
≥ 6	0	27	184	413	677	958	1218	1459	1851
≥ 7	0	7	86	265	438	674	918	1140	1533
≥ 8	0	2	31	134	297	468	682	890	1255
≥ 9	0	0	11	74	189	332	491	680	1024
≥ 10	0	0	6	37	115	241	363	516	846

Allegato B

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	194	434	675	933	1154	1440	1727	2254
≥ 5	0	92	256	457	653	832	993	1173	1554
≥ 6	0	29	160	301	471	634	780	914	1174
≥ 7	0	3	92	206	344	482	618	750	965
≥ 8	0	0	43	137	241	364	490	611	811
≥ 9	0	0	18	91	178	271	383	496	692
≥ 10	0	0	3	51	126	213	299	402	593

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	316	522	685	847	1048	1239	1457	1795
≥ 5	0	142	380	527	665	813	962	1131	1412
≥ 6	0	35	222	414	534	661	795	922	1178
≥ 7	0	12	127	305	442	540	643	776	999
≥ 8	0	1	49	191	335	467	545	641	865
≥ 9	0	0	22	129	238	372	480	554	747
≥ 10	0	0	7	70	176	289	403	486	635

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



Allegato B

**ΔT e Pioggia**

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	0	9	15	22	26	33	44
≥ 5	0	0	0	3	7	13	19	25	32
≥ 6	0	0	0	0	5	8	12	16	27
≥ 7	0	0	0	0	0	5	9	12	18
≥ 8	0	0	0	0	0	1	6	9	15
≥ 9	0	0	0	0	0	0	2	6	9
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	3	9

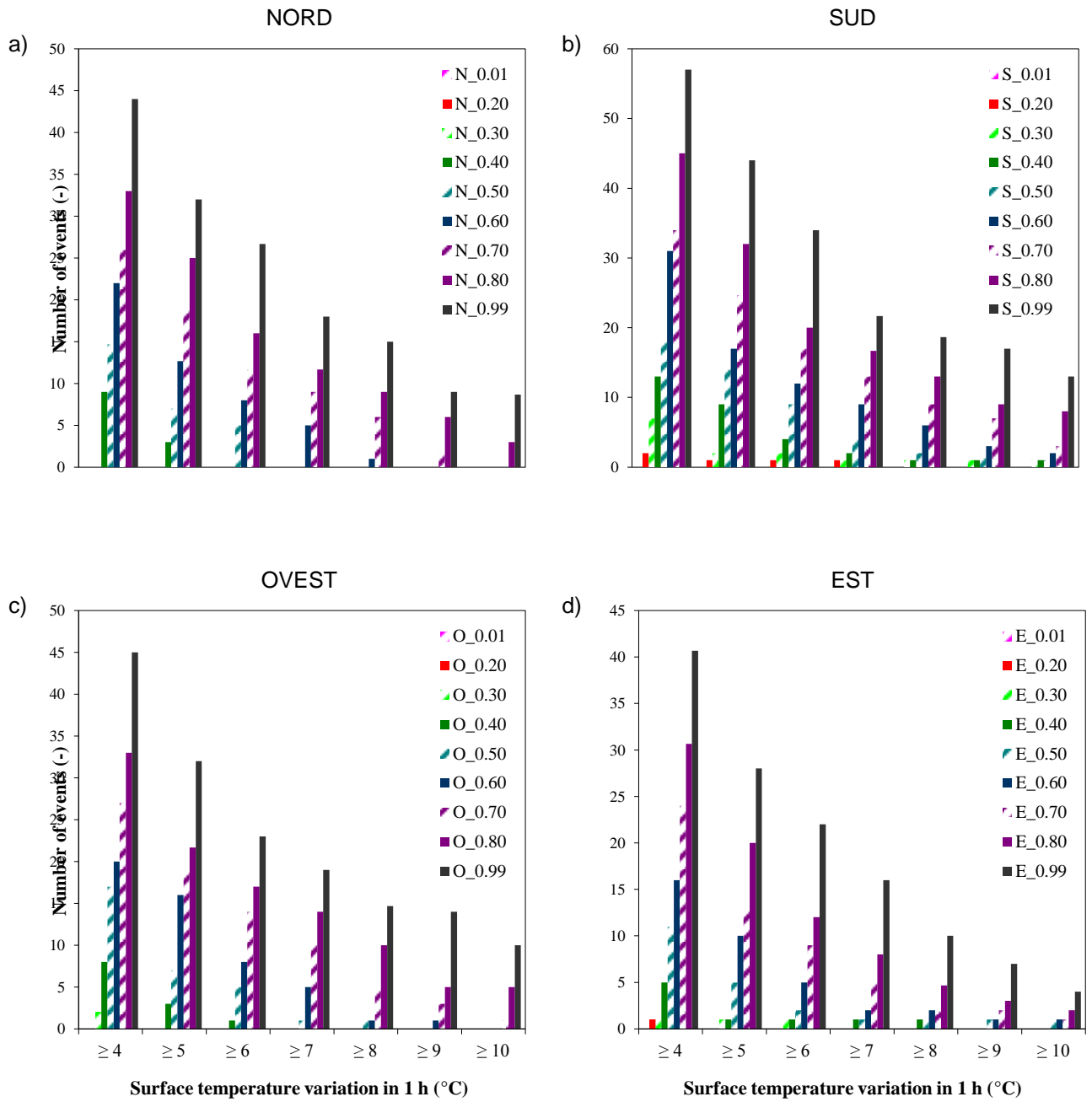
h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	2	7	13	18	31	34	45	57
≥ 5	0	1	2	9	14	17	25	32	44
≥ 6	0	1	2	4	9	12	17	20	34
≥ 7	0	1	1	2	4	9	13	17	22
≥ 8	0	0	1	1	2	6	9	13	19
≥ 9	0	0	1	1	2	3	7	9	17
≥ 10	0	0	1	1	1	2	3	8	13

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	2	8	17	20	27	33	45
≥ 5	0	0	0	3	7	16	19	22	32
≥ 6	0	0	0	1	5	8	14	17	23
≥ 7	0	0	0	0	1	5	10	14	19
≥ 8	0	0	0	0	1	1	5	10	15
≥ 9	0	0	0	0	0	1	3	5	14
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	5	10

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	1	1	5	11	16	24	31	41
≥ 5	0	0	1	1	5	10	13	20	28
≥ 6	0	0	1	1	2	5	9	12	22
≥ 7	0	0	0	1	1	2	5	8	16
≥ 8	0	0	0	1	1	2	2	5	10
≥ 9	0	0	0	0	1	1	2	3	7
≥ 10	0	0	0	0	1	1	1	2	4

Allegato B



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**$\Delta T$  e Pioggia e Estate**

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	0	4	9	10	11	13	18
≥ 5	0	0	0	1	4	7	10	11	13
≥ 6	0	0	0	0	3	5	6	8	12
≥ 7	0	0	0	0	0	3	6	6	8
≥ 8	0	0	0	0	0	1	4	6	8
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	4	6
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	6

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	0	3	6	8	13	13	17	19
≥ 5	0	0	0	5	6	8	10	13	16
≥ 6	0	0	0	2	5	5	8	10	13
≥ 7	0	0	0	0	2	5	6	7	10
≥ 8	0	0	0	0	0	4	5	6	9
≥ 9	0	0	0	0	0	1	5	5	8
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	5	5

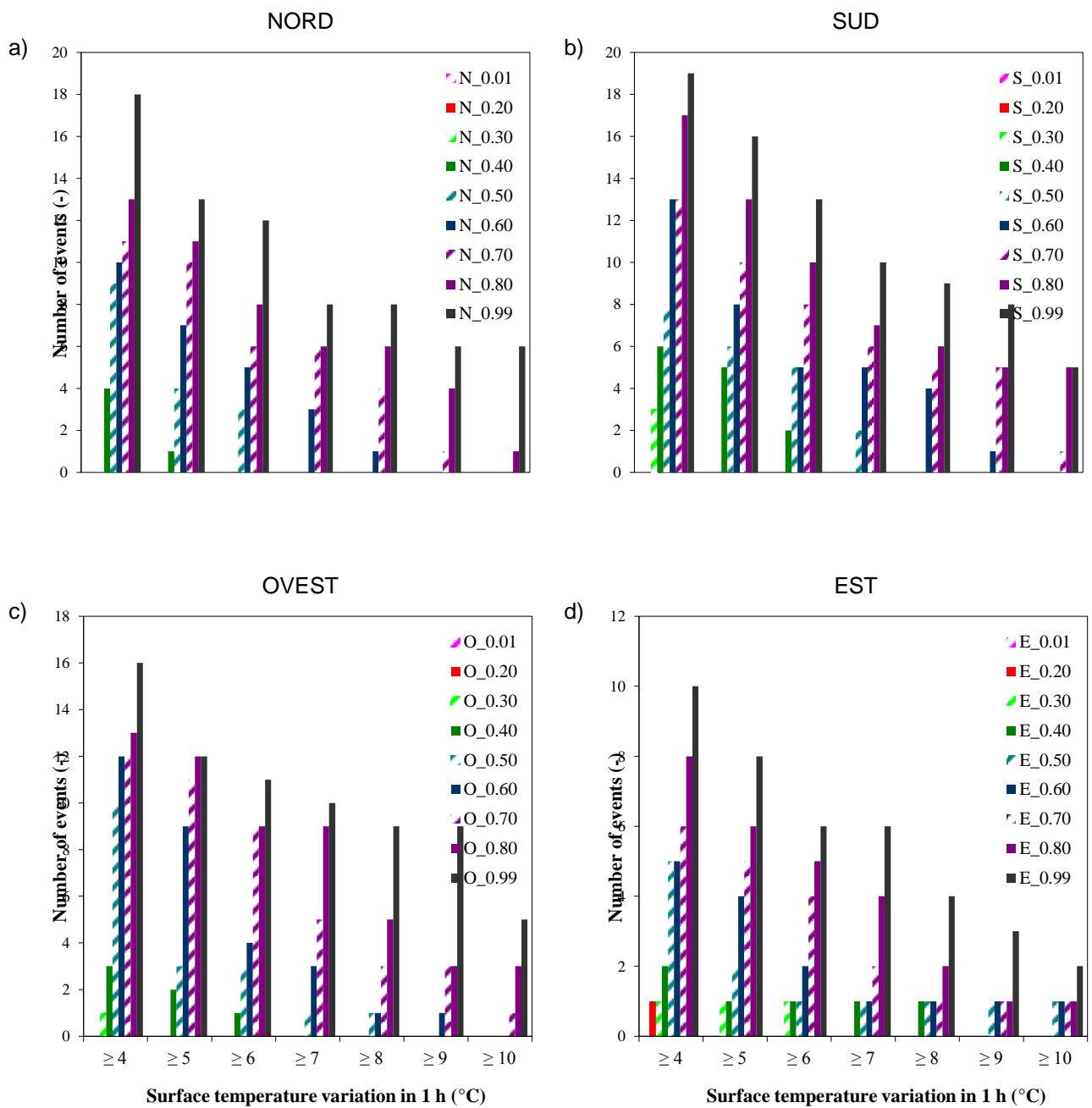


Allegato B

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	1	3	10	12	12	13	16
≥ 5	0	0	0	2	3	9	11	12	12
≥ 6	0	0	0	1	3	4	9	9	11
≥ 7	0	0	0	0	1	3	5	9	10
≥ 8	0	0	0	0	1	1	3	5	9
≥ 9	0	0	0	0	0	1	3	3	9
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	3	5

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	1	1	2	5	5	6	8	10
≥ 5	0	0	1	1	2	4	5	6	8
≥ 6	0	0	1	1	1	2	4	5	6
≥ 7	0	0	0	1	1	1	2	4	6
≥ 8	0	0	0	1	1	1	1	2	4
≥ 9	0	0	0	0	1	1	1	1	3
≥ 10	0	0	0	0	1	1	1	1	2

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



Allegato B

**$\Delta T$  e Pioggia e Temperatura Superficiale  $\geq 40^\circ\text{C}$**

h/anno Limiti	Roma_ $\Delta T$ &Pioggia&T sup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	0	1	1	1	5
$\geq 5$	0	0	0	0	0	1	1	1	5
$\geq 6$	0	0	0	0	0	1	1	1	4
$\geq 7$	0	0	0	0	0	1	1	1	3
$\geq 8$	0	0	0	0	0	1	1	1	3
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	1	1	2
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	1	2

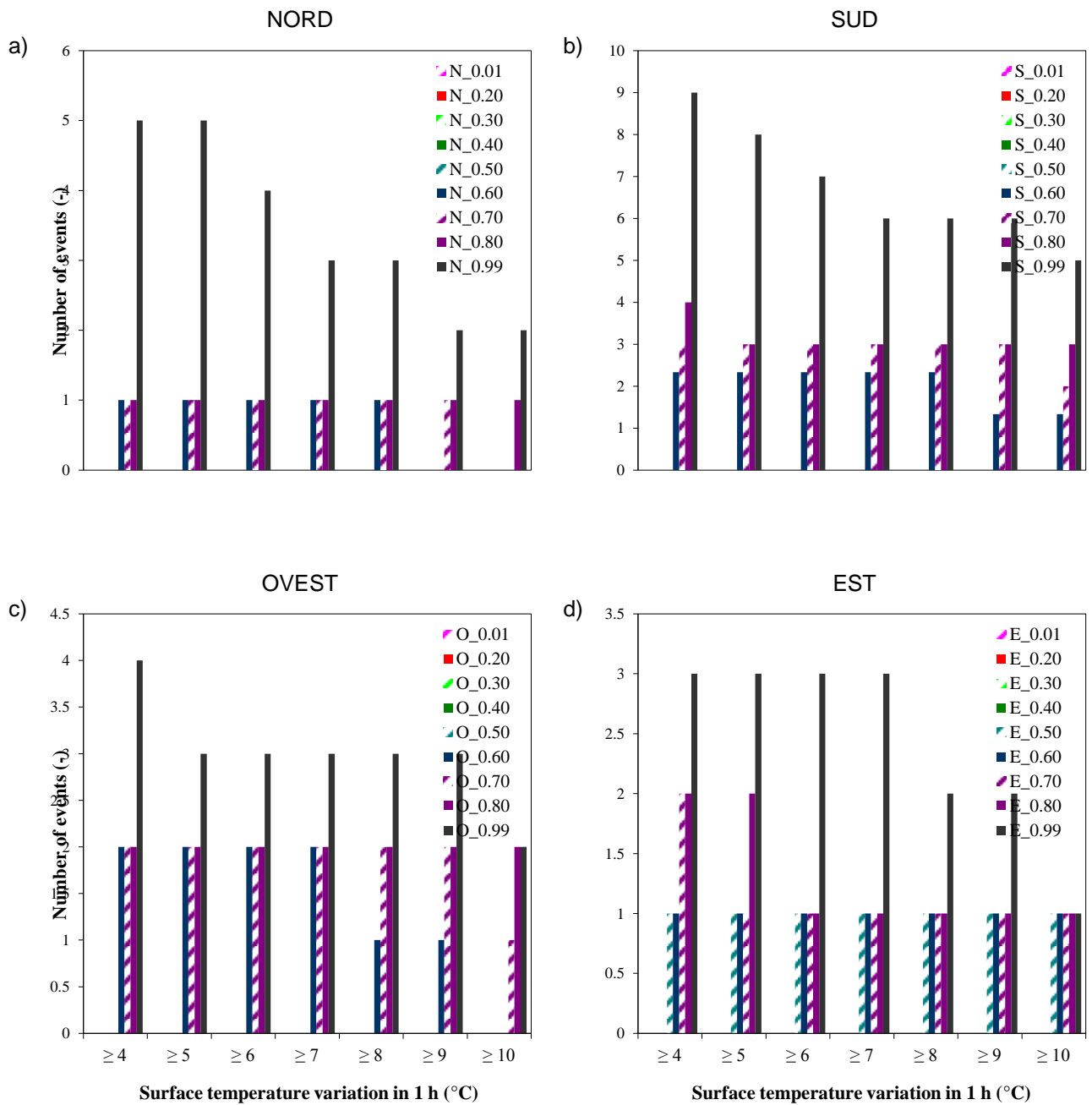
h/anno Limiti	Roma_ $\Delta T$ &Pioggia&T sup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	0	2	3	4	9
$\geq 5$	0	0	0	0	0	2	3	3	8
$\geq 6$	0	0	0	0	0	2	3	3	7
$\geq 7$	0	0	0	0	0	2	3	3	6
$\geq 8$	0	0	0	0	0	2	3	3	6
$\geq 9$	0	0	0	0	0	1	3	3	6
$\geq 10$	0	0	0	0	0	1	2	3	5

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&T sup ≥ 40°C								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	0	0	0	2	2	2	4
≥ 5	0	0	0	0	0	2	2	2	3
≥ 6	0	0	0	0	0	2	2	2	3
≥ 7	0	0	0	0	0	2	2	2	3
≥ 8	0	0	0	0	0	1	2	2	3
≥ 9	0	0	0	0	0	1	2	2	3
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	2	2

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&T sup ≥ 40°C								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	0	0	1	1	2	2	3
≥ 5	0	0	0	0	1	1	1	2	3
≥ 6	0	0	0	0	1	1	1	1	3
≥ 7	0	0	0	0	1	1	1	1	3
≥ 8	0	0	0	0	1	1	1	1	2
≥ 9	0	0	0	0	1	1	1	1	2
≥ 10	0	0	0	0	1	1	1	1	1

Allegato B



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**ΔT Classi di temperature**

h/anno Limiti	Roma_ΔT Classe di temperature								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0 - 5	355	337	324	320	319	317	311	308	303
5 - 10	1595	1466	1438	1398	1373	1344	1326	1314	1283
10 - 15	2210	2086	2008	1961	1891	1846	1784	1727	1663
15 - 20	2161	2068	1988	1915	1852	1790	1753	1724	1647
20 - 25	1526	1549	1572	1568	1556	1503	1461	1431	1358
25 - 30	804	877	915	928	925	946	976	948	906
30 - 35	103	365	474	546	617	676	676	695	687
35 - 40	0	7	36	116	214	303	375	442	552
40 - 45	0	0	0	2	7	30	89	155	273
45 - 50	0	0	0	0	0	0	2	11	78
50 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	5
55 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 - 70	0	0	0	0	0	0	0	0	0

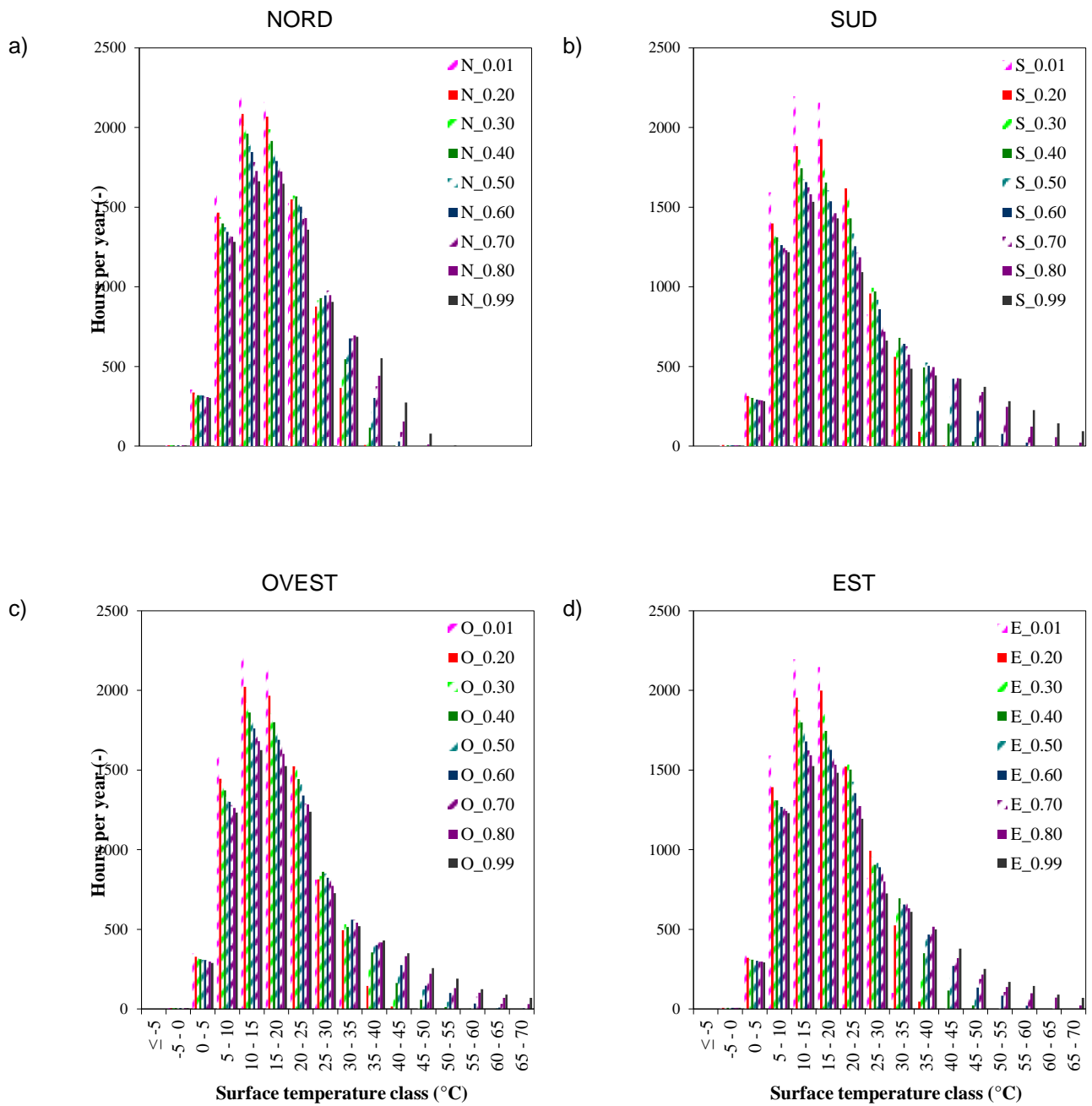
h/anno Limiti	Roma_ΔT Classe di temperature								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	7	7	6	6	6	6	6	6	6
0 - 5	353	315	310	302	293	292	290	288	282
5 - 10	1593	1398	1351	1311	1288	1262	1243	1230	1218
10 - 15	2195	1882	1798	1744	1676	1657	1625	1581	1534
15 - 20	2156	1927	1749	1653	1607	1536	1491	1461	1430
20 - 25	1520	1619	1571	1430	1335	1256	1215	1186	1093
25 - 30	827	958	993	971	919	859	754	719	662
30 - 35	109	560	646	679	670	642	628	575	486
35 - 40	0	91	286	494	525	505	523	496	444
40 - 45	0	3	49	141	313	423	421	427	423
45 - 50	0	0	2	29	104	221	320	339	373
50 - 55	0	0	0	0	24	77	156	247	282
55 - 60	0	0	0	0	0	23	66	122	225
60 - 65	0	0	0	0	0	0	20	57	143
65 - 70	0	0	0	0	0	0	2	22	93

Allegato B

h/anno Limiti	Roma_ΔT Classe di temperature								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0 - 5	349	329	317	313	309	307	301	298	289
5 - 10	1582	1445	1418	1371	1333	1301	1280	1261	1233
10 - 15	2221	2023	1923	1860	1802	1761	1710	1680	1625
15 - 20	2154	1967	1856	1800	1731	1690	1658	1601	1525
20 - 25	1515	1524	1507	1444	1412	1341	1291	1283	1238
25 - 30	812	813	836	862	850	824	813	773	727
30 - 35	121	494	532	515	517	561	563	543	519
35 - 40	0	145	271	354	398	402	422	418	431
40 - 45	0	15	78	163	218	275	290	331	349
45 - 50	0	0	15	58	124	146	176	220	256
50 - 55	0	0	1	13	47	100	127	131	190
55 - 60	0	0	0	1	10	35	78	102	124
60 - 65	0	0	0	0	3	9	32	69	90
65 - 70	0	0	0	0	0	4	9	31	70

h/anno Limiti	Roma_ΔT Classe di temperature								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	7	7	7	7	7	7	7	7	6
0 - 5	359	322	314	310	304	302	298	297	292
5 - 10	1591	1392	1336	1309	1279	1268	1260	1243	1229
10 - 15	2196	1955	1877	1798	1752	1679	1624	1592	1524
15 - 20	2146	1999	1853	1745	1665	1626	1589	1533	1482
20 - 25	1535	1521	1536	1503	1427	1354	1295	1273	1194
25 - 30	824	994	956	906	918	891	853	800	726
30 - 35	103	525	651	695	660	656	663	632	611
35 - 40	0	46	204	349	441	468	474	516	500
40 - 45	0	0	26	116	197	270	300	320	379
45 - 50	0	0	0	22	89	134	189	215	251
50 - 55	0	0	0	0	22	84	107	138	169
55 - 60	0	0	0	0	0	21	82	100	144
60 - 65	0	0	0	0	0	0	18	71	91
65 - 70	0	0	0	0	0	0	2	22	70

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*





Allegato B

B.2.2 EPS: 3\_Palermo

$\Delta T$

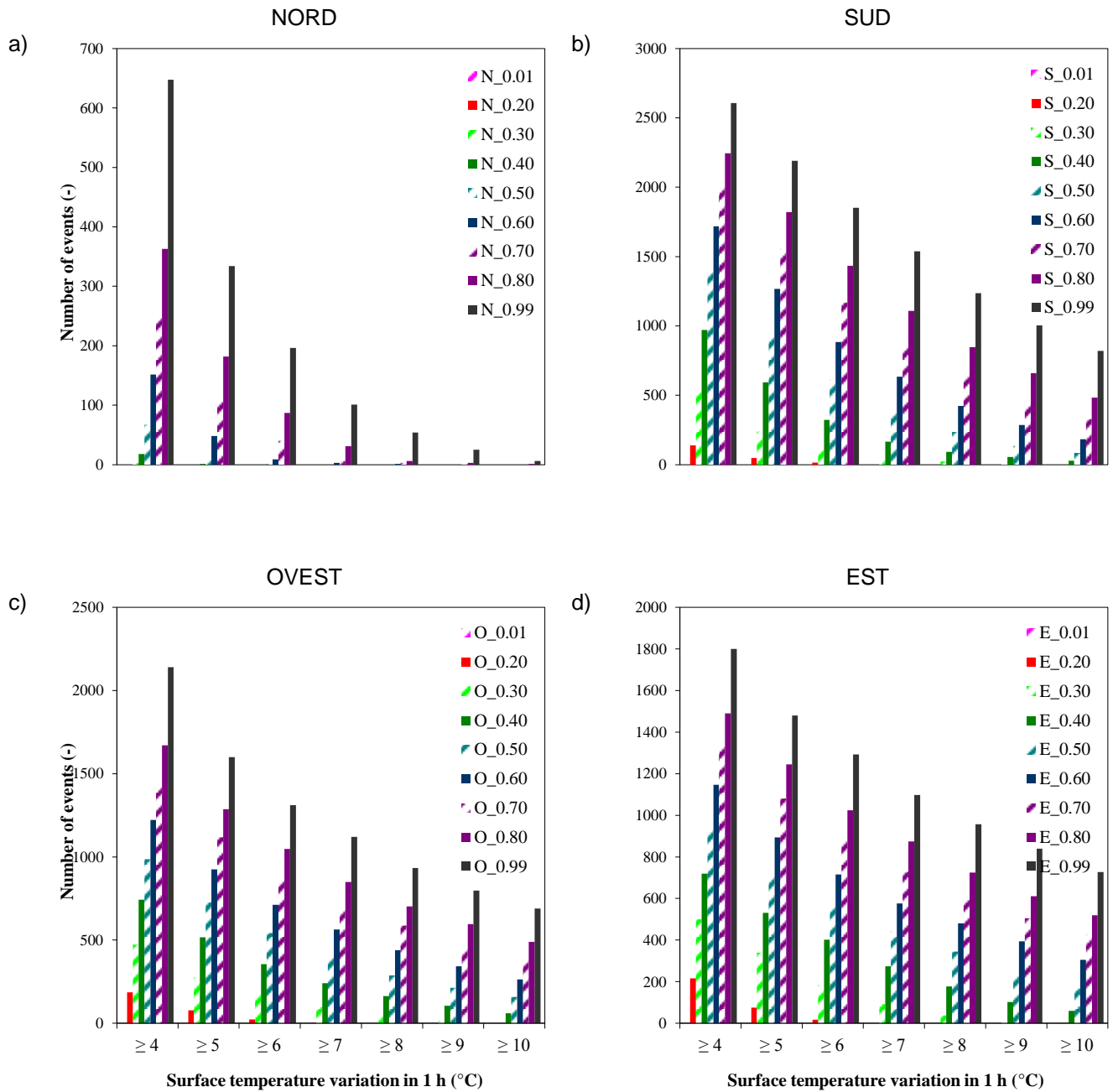
h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	2	18	67	152	248	363	648
≥ 5	0	0	0	1	12	48	106	182	334
≥ 6	0	0	0	0	1	9	40	87	196
≥ 7	0	0	0	0	0	3	6	31	101
≥ 8	0	0	0	0	0	1	3	6	54
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	3	25
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	6

h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	138	542	970	1388	1719	2009	2244	2607
≥ 5	0	47	238	593	919	1267	1558	1820	2191
≥ 6	0	14	105	323	616	884	1169	1434	1852
≥ 7	0	0	52	166	380	635	866	1108	1538
≥ 8	0	0	22	92	235	423	648	848	1236
≥ 9	0	0	8	55	135	286	459	660	1005
≥ 10	0	0	0	29	84	184	329	483	820

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	187	473	742	987	1221	1429	1670	2140
≥ 5	0	78	276	517	728	925	1119	1286	1600
≥ 6	0	23	174	356	542	713	882	1047	1311
≥ 7	0	1	99	242	407	563	705	850	1121
≥ 8	0	0	46	163	288	440	589	702	933
≥ 9	0	0	14	105	214	342	467	597	798
≥ 10	0	0	2	61	158	264	384	490	690

h/anno Limiti	Palermo_ΔT								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	216	500	720	939	1147	1333	1490	1800
≥ 5	0	76	339	530	713	894	1081	1245	1480
≥ 6	0	17	185	401	560	716	885	1024	1292
≥ 7	0	0	93	275	444	576	729	874	1098
≥ 8	0	0	38	177	345	480	594	724	956
≥ 9	0	0	10	102	243	394	506	611	840
≥ 10	0	0	1	60	168	305	426	520	728



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**ΔT e Pioggia**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT & Pioggia								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	1	2	7	15	22	27	46
≥ 5	0	0	0	1	1	5	12	19	27
≥ 6	0	0	0	0	1	1	5	11	20
≥ 7	0	0	0	0	0	1	1	4	15
≥ 8	0	0	0	0	0	1	1	1	6
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	1	3
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	1

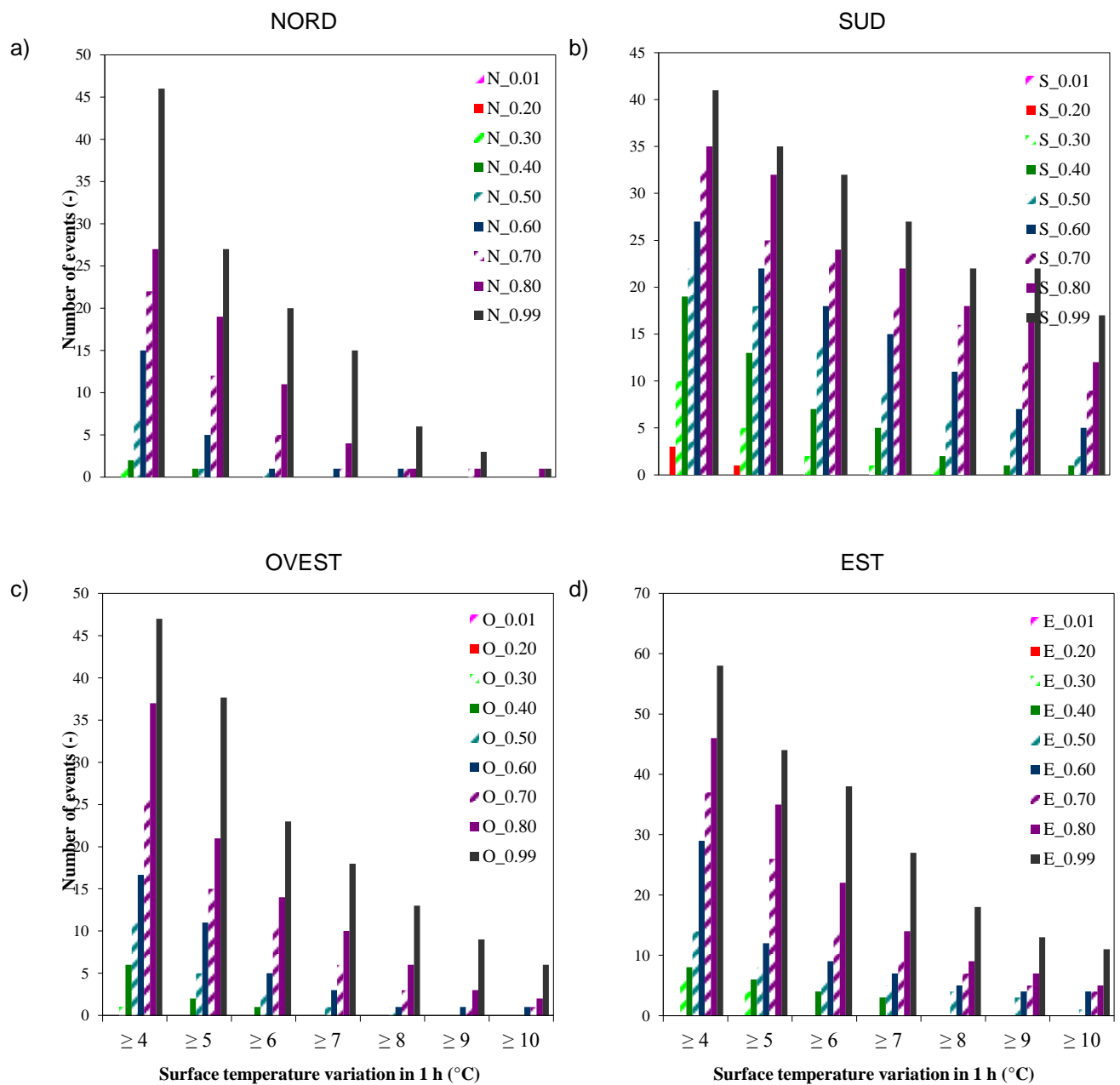
h/anno Limiti	Palermo_ΔT & Pioggia								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	3	10	19	22	27	33	35	41
≥ 5	0	1	5	13	18	22	25	32	35
≥ 6	0	0	2	7	14	18	23	24	32
≥ 7	0	0	1	5	9	15	18	22	27
≥ 8	0	0	1	2	6	11	16	18	22
≥ 9	0	0	0	1	5	7	12	17	22
≥ 10	0	0	0	1	2	5	9	12	17

Allegato B

h/anno Limiti	Palermo_ΔT & Pioggia								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	1	6	11	17	26	37	47
≥ 5	0	0	0	2	5	11	15	21	38
≥ 6	0	0	0	1	3	5	11	14	23
≥ 7	0	0	0	0	1	3	6	10	18
≥ 8	0	0	0	0	1	1	3	6	13
≥ 9	0	0	0	0	0	1	1	3	9
≥ 10	0	0	0	0	0	1	1	2	6

h/anno Limiti	Palermo_ΔT & Pioggia								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	6	8	14	29	37	46	58
≥ 5	0	0	4	6	8	12	26	35	44
≥ 6	0	0	0	4	6	9	14	22	38
≥ 7	0	0	0	3	5	7	9	14	27
≥ 8	0	0	0	0	4	5	7	9	18
≥ 9	0	0	0	0	3	4	5	7	13
≥ 10	0	0	0	0	1	4	4	5	11

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



Allegato B

**ΔT e Pioggia e Estate**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	1	1	3	7	9	10	15
≥ 5	0	0	0	1	1	2	5	8	11
≥ 6	0	0	0	0	1	1	2	4	8
≥ 7	0	0	0	0	0	1	1	2	6
≥ 8	0	0	0	0	0	1	1	1	3
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	1	2
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	1

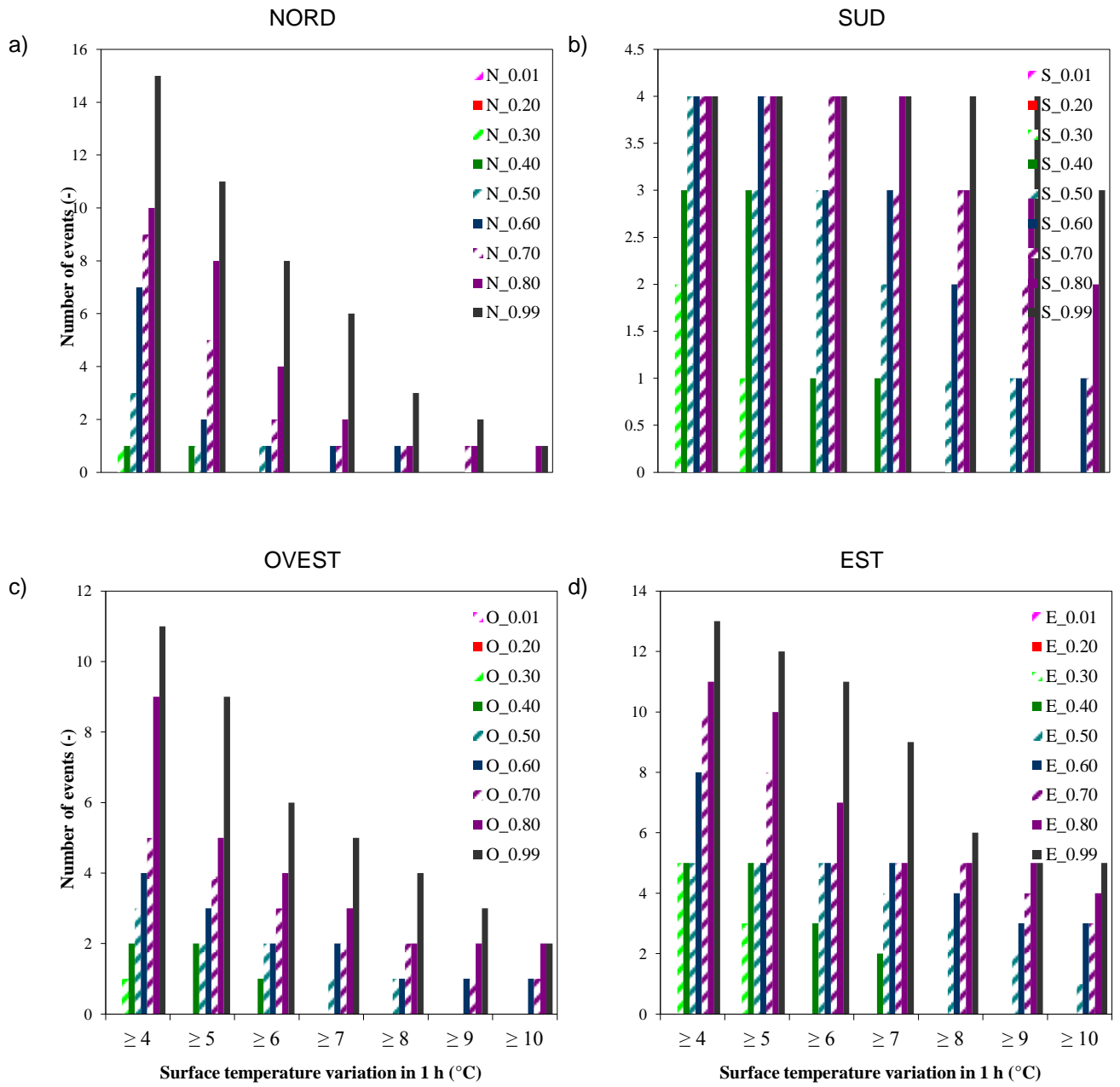
h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	0	2	3	4	4	4	4	4
≥ 5	0	0	1	3	3	4	4	4	4
≥ 6	0	0	0	1	3	3	4	4	4
≥ 7	0	0	0	1	2	3	3	4	4
≥ 8	0	0	0	0	1	2	3	3	4
≥ 9	0	0	0	0	1	1	2	3	4
≥ 10	0	0	0	0	0	1	1	2	3

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	1	2	3	4	5	9	11
≥ 5	0	0	0	2	2	3	4	5	9
≥ 6	0	0	0	1	2	2	3	4	6
≥ 7	0	0	0	0	1	2	2	3	5
≥ 8	0	0	0	0	1	1	2	2	4
≥ 9	0	0	0	0	0	1	1	2	3
≥ 10	0	0	0	0	0	1	1	2	2

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Estate								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	5	5	5	8	10	11	13
≥ 5	0	0	3	5	5	5	8	10	12
≥ 6	0	0	0	3	5	5	5	7	11
≥ 7	0	0	0	2	4	5	5	5	9
≥ 8	0	0	0	0	3	4	5	5	6
≥ 9	0	0	0	0	2	3	4	5	5
≥ 10	0	0	0	0	1	3	3	4	5





*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**$\Delta T$  e Pioggia e Temperatura Superficiale  $\geq 40^\circ\text{C}$**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Tsup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	0	0	0	0	4
$\geq 5$	0	0	0	0	0	0	0	0	3
$\geq 6$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 7$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 8$	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	1

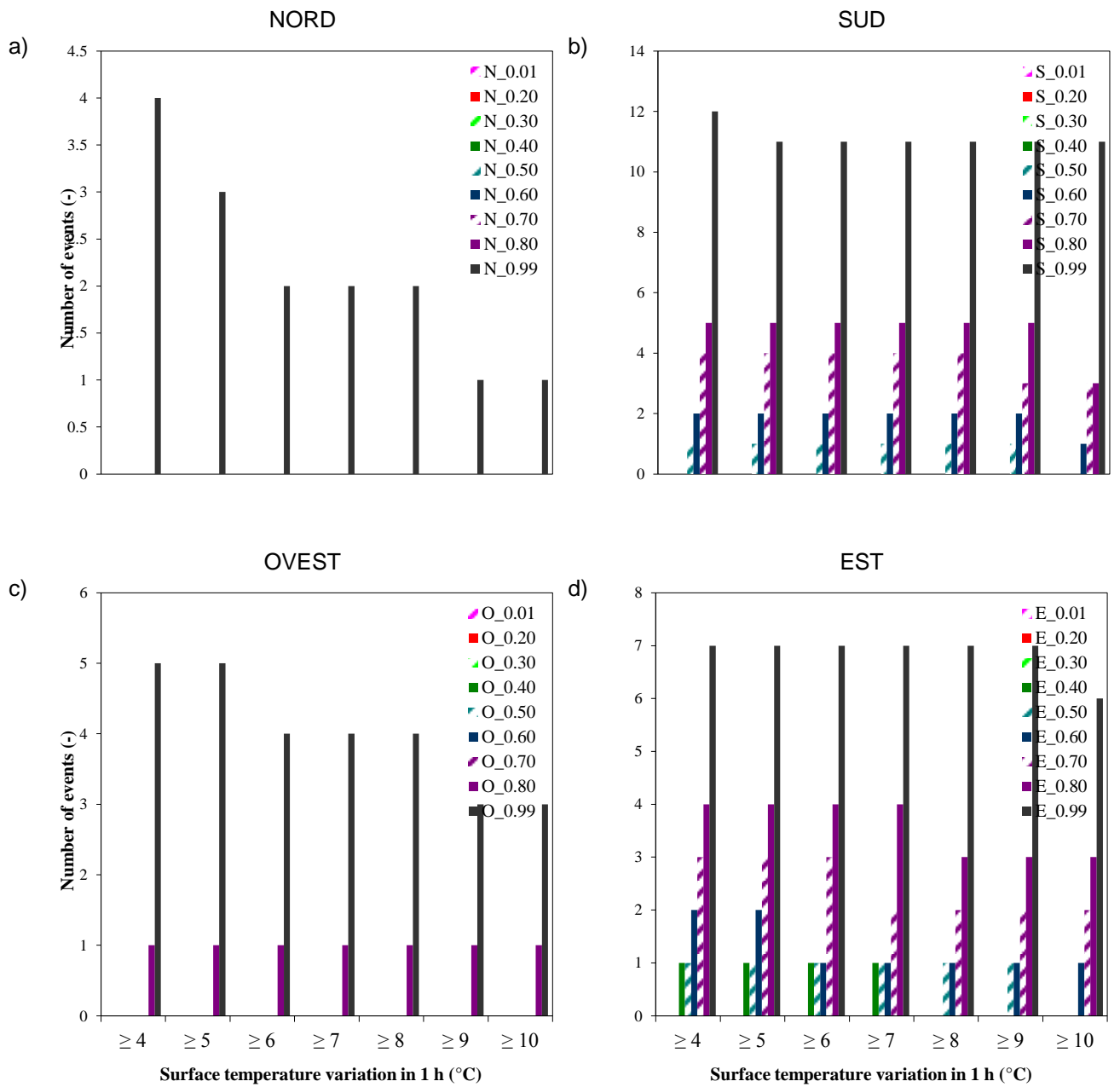
h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Tsup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	1	2	4	5	12
$\geq 5$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 6$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 7$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 8$	0	0	0	0	1	2	4	5	11
$\geq 9$	0	0	0	0	1	2	3	5	11
$\geq 10$	0	0	0	0	0	1	3	3	11

Allegato B

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	0	0	0	0	0	1	5
≥ 5	0	0	0	0	0	0	0	1	5
≥ 6	0	0	0	0	0	0	0	1	4
≥ 7	0	0	0	0	0	0	0	1	4
≥ 8	0	0	0	0	0	0	0	1	4
≥ 9	0	0	0	0	0	0	0	1	3
≥ 10	0	0	0	0	0	0	0	1	3

h/anno Limiti	Palermo_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	0	1	1	2	3	4	7
≥ 5	0	0	0	1	1	2	3	4	7
≥ 6	0	0	0	1	1	1	3	4	7
≥ 7	0	0	0	1	1	1	2	4	7
≥ 8	0	0	0	0	1	1	2	3	7
≥ 9	0	0	0	0	1	1	2	3	7
≥ 10	0	0	0	0	0	1	2	3	6

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



Allegato B

**ΔT Classi di temperature**

h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classi di Temperature								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	5	5	4	4	4	4	4	4	4
5 - 10	493	445	430	423	418	406	402	393	385
10 - 15	2476	2279	2181	2108	2038	1997	1940	1913	1848
15 - 20	2530	2475	2427	2371	2291	2205	2117	2056	1936
20 - 25	2121	2084	2076	2047	2034	2029	2053	2020	1963
25 - 30	1024	1197	1207	1214	1221	1201	1170	1157	1137
30 - 35	112	263	407	544	659	734	770	774	777
35 - 40	0	12	29	50	95	176	278	390	553
40 - 45	0	0	0	0	0	9	26	54	144
45 - 50	0	0	0	0	0	0	0	0	14
50 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 - 70	0	0	0	0	0	0	0	0	0

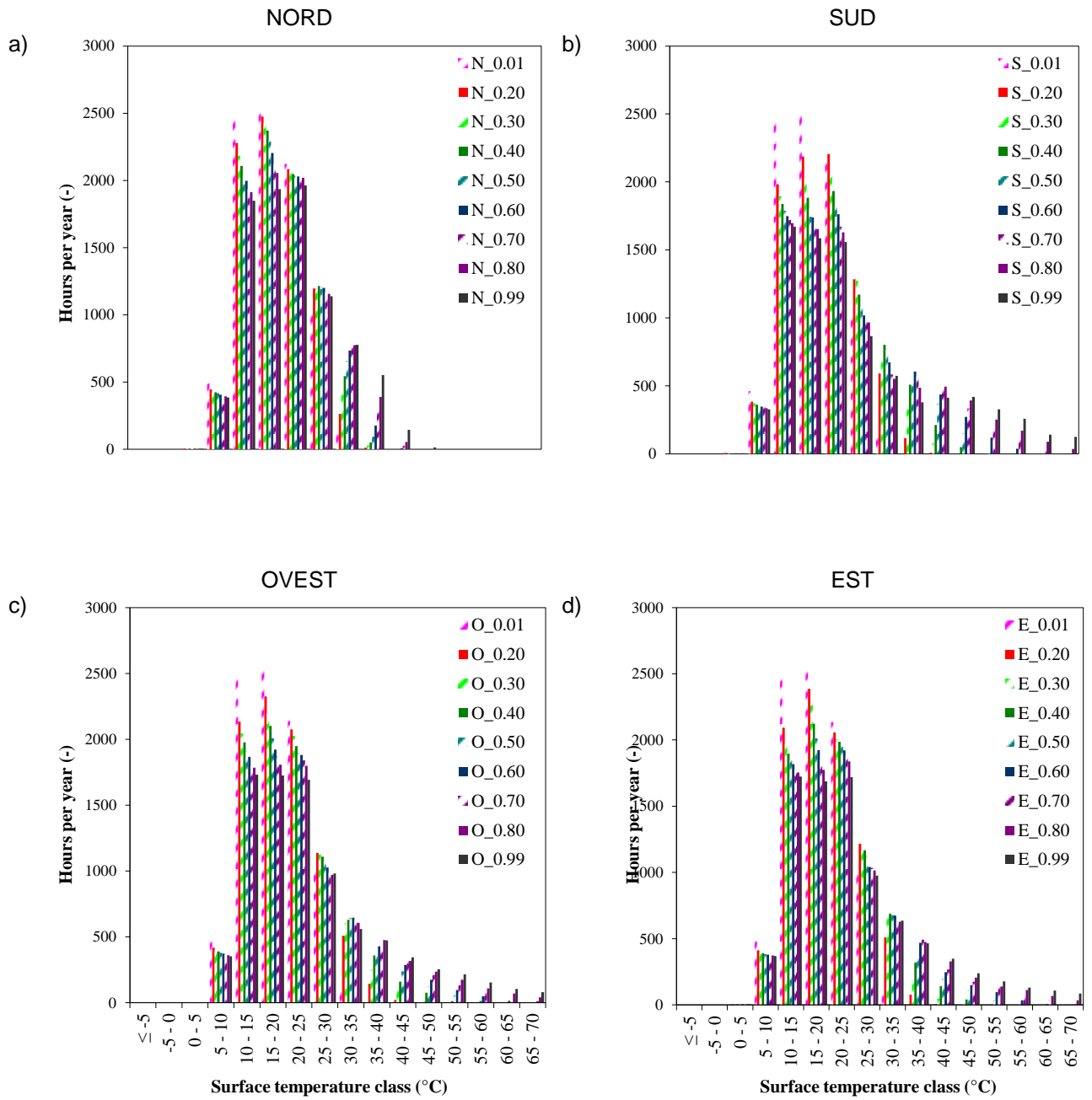
h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classi di temperature								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	5	5	5	4	4	4	4	4	4
5 - 10	460	383	370	362	356	348	340	336	327
10 - 15	2450	1983	1895	1837	1788	1749	1721	1698	1671
15 - 20	2521	2186	2027	1884	1804	1738	1703	1654	1586
20 - 25	2168	2205	2062	1933	1832	1761	1670	1628	1557
25 - 30	1039	1284	1273	1172	1085	1017	1016	966	865
30 - 35	117	592	725	801	765	673	584	552	573
35 - 40	0	115	326	507	568	604	568	485	378
40 - 45	0	8	77	212	369	436	481	493	412
45 - 50	0	0	0	49	148	271	333	392	419
50 - 55	0	0	0	0	41	119	195	251	328
55 - 60	0	0	0	0	1	38	103	170	258
60 - 65	0	0	0	0	0	2	40	89	140
65 - 70	0	0	0	0	0	0	3	36	125

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Palermo_Classi di Temperatura								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	4	4	4	4	4	4	3	3	3
5 - 10	476	417	398	388	379	373	371	361	351
10 - 15	2467	2134	2044	1977	1911	1865	1806	1785	1732
15 - 20	2523	2325	2201	2101	2008	1922	1870	1806	1725
20 - 25	2138	2075	2026	1948	1896	1881	1841	1798	1692
25 - 30	1034	1137	1124	1108	1081	1025	987	970	980
30 - 35	119	507	605	629	645	644	635	606	559
35 - 40	0	142	251	357	406	427	445	475	472
40 - 45	0	19	94	159	236	286	321	316	344
45 - 50	0	1	13	76	124	173	210	234	254
50 - 55	0	0	1	12	56	96	133	173	215
55 - 60	0	0	0	1	13	49	81	109	154
60 - 65	0	0	0	0	1	13	42	69	104
65 - 70	0	0	0	0	0	2	11	41	80

h/anno Limiti	Palermo_ΔT Classi di Temperature								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0 - 5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5 - 10	483	412	399	389	384	379	378	374	368
10 - 15	2462	2092	1974	1896	1847	1817	1779	1753	1724
15 - 20	2517	2386	2266	2122	2012	1923	1854	1775	1688
20 - 25	2136	2057	2006	1987	1950	1922	1874	1838	1719
25 - 30	1041	1216	1165	1167	1126	1040	1034	1016	976
30 - 35	116	510	679	688	677	675	645	627	635
35 - 40	0	77	215	320	405	468	493	475	465
40 - 45	0	6	46	140	201	246	266	328	349
45 - 50	0	0	5	40	112	149	175	207	238
50 - 55	0	0	0	5	34	96	134	139	178
55 - 60	0	0	0	0	7	34	80	113	130
60 - 65	0	0	0	0	0	6	36	67	108
65 - 70	0	0	0	0	0	1	6	35	85

*Allegato B*



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

4\_Roma

**ΔT**

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	8	57	162	323	527	782	1228
≥ 5	0	0	0	10	40	100	202	325	612
≥ 6	0	0	0	0	9	37	74	141	312
≥ 7	0	0	0	0	0	10	32	63	172
≥ 8	0	0	0	0	0	3	10	30	87
≥ 9	0	0	0	0	0	0	4	10	50
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	4	24

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	341	763	1187	1520	1843	2098	2313	2700
≥ 5	0	133	402	739	1076	1362	1636	1867	2243
≥ 6	0	34	215	450	731	1007	1258	1497	1873
≥ 7	0	8	100	284	480	720	963	1190	1559
≥ 8	0	4	45	160	328	504	722	931	1298
≥ 9	0	0	15	92	220	361	529	728	1066
≥ 10	0	0	8	51	136	263	397	547	869

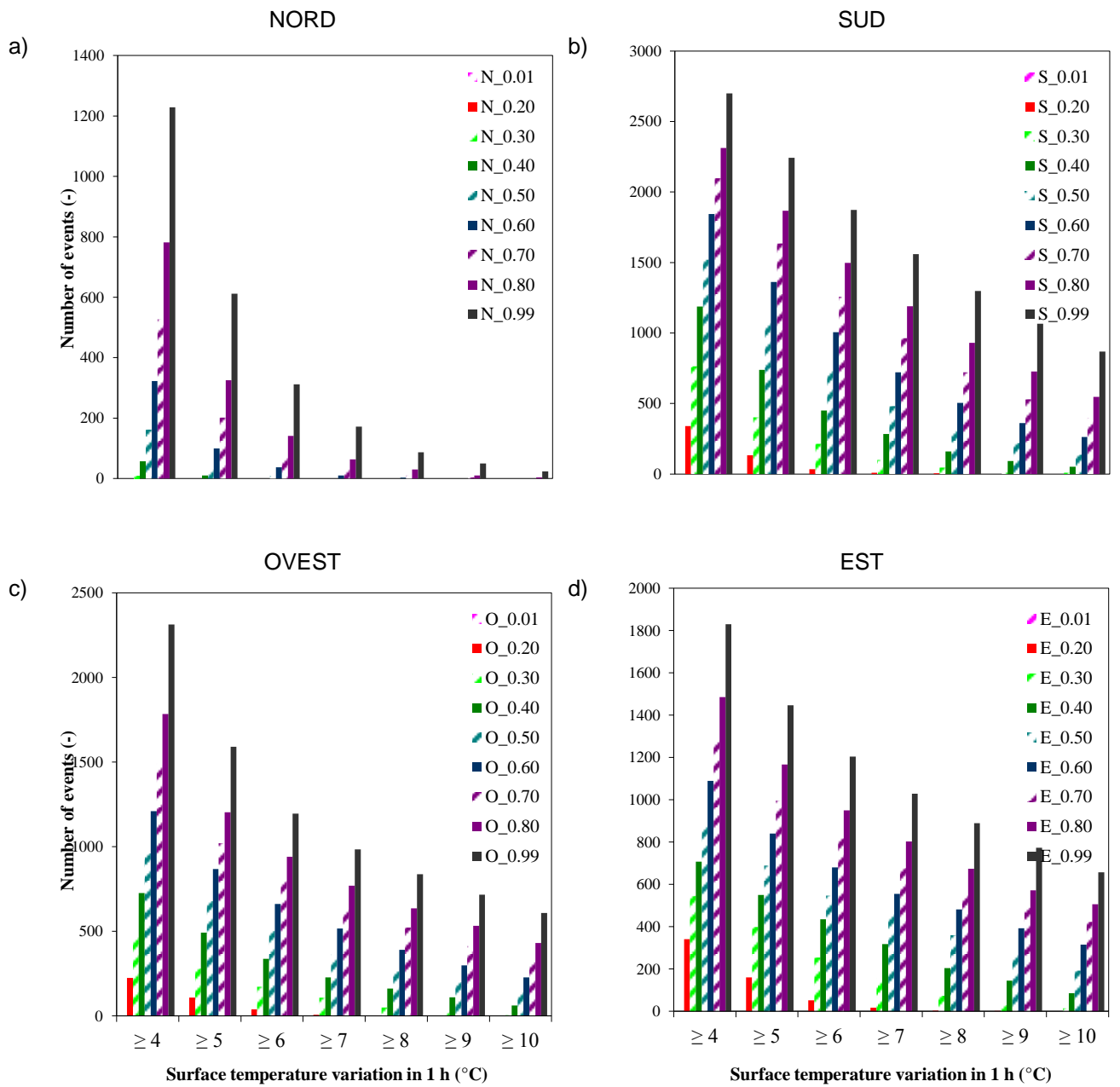


Allegato B

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	224	469	725	960	1209	1489	1783	2313
≥ 5	0	108	281	491	678	867	1021	1202	1590
≥ 6	0	39	172	337	503	661	810	940	1195
≥ 7	0	6	107	227	365	516	645	769	984
≥ 8	0	1	50	160	264	390	523	634	837
≥ 9	0	0	23	109	199	297	413	532	716
≥ 10	0	0	4	61	144	226	323	430	608

h/anno Limiti	Roma_ΔT								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	340	546	707	880	1089	1282	1485	1829
≥ 5	0	159	399	549	689	840	997	1166	1447
≥ 6	0	51	254	435	547	680	818	950	1203
≥ 7	0	16	157	317	460	555	677	803	1029
≥ 8	0	3	74	204	360	481	559	674	889
≥ 9	0	1	29	145	272	392	490	572	773
≥ 10	0	0	15	85	192	315	423	506	656

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



Allegato B

**ΔT e Pioggia**

h/anno Limiti	Roma_ΔT & Pioggia								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	3	11	16	22	28	34	46
≥ 5	0	0	0	5	9	14	19	25	34
≥ 6	0	0	0	0	5	9	14	16	26
≥ 7	0	0	0	0	0	6	9	13	19
≥ 8	0	0	0	0	0	2	6	9	16
≥ 9	0	0	0	0	0	0	3	6	12
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	3	9

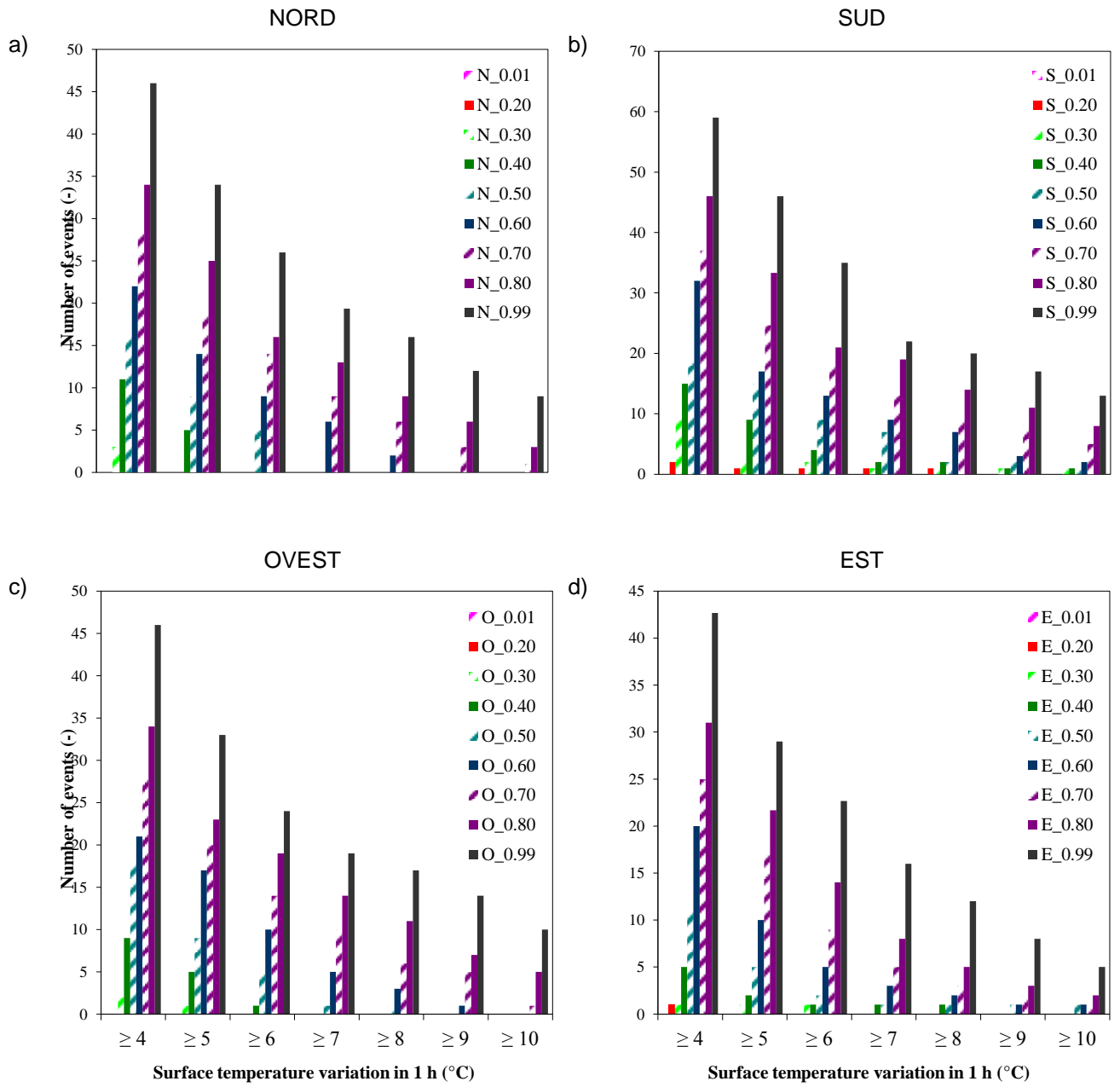
h/anno Limiti	Roma_ΔT & Pioggia								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	2	9	15	19	32	37	46	59
≥ 5	0	1	2	9	15	17	25	33	46
≥ 6	0	1	2	4	9	13	18	21	35
≥ 7	0	1	1	2	7	9	13	19	22
≥ 8	0	1	1	2	2	7	9	14	20
≥ 9	0	0	1	1	2	3	8	11	17
≥ 10	0	0	1	1	1	2	5	8	13

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Roma_ΔT & Pioggia								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	2	9	18	21	28	34	46
≥ 5	0	0	1	5	9	17	20	23	33
≥ 6	0	0	0	1	5	10	14	19	24
≥ 7	0	0	0	0	1	5	10	14	19
≥ 8	0	0	0	0	1	3	6	11	17
≥ 9	0	0	0	0	0	1	5	7	14
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	5	10

h/anno Limiti	Roma_ΔT & Pioggia								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	1	1	5	11	20	25	31	43
≥ 5	0	0	1	2	5	10	17	22	29
≥ 6	0	0	1	1	2	5	9	14	23
≥ 7	0	0	0	1	1	3	5	8	16
≥ 8	0	0	0	1	1	2	3	5	12
≥ 9	0	0	0	0	1	1	2	3	8
≥ 10	0	0	0	0	1	1	1	2	5

Allegato B



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**$\Delta T$  e Pioggia e Estate**

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≥ 4	0	0	1	6	9	10	12	13	18
≥ 5	0	0	0	3	6	8	10	11	13
≥ 6	0	0	0	0	3	6	8	8	11
≥ 7	0	0	0	0	0	4	6	8	9
≥ 8	0	0	0	0	0	1	4	6	8
≥ 9	0	0	0	0	0	0	1	4	8
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	1	6

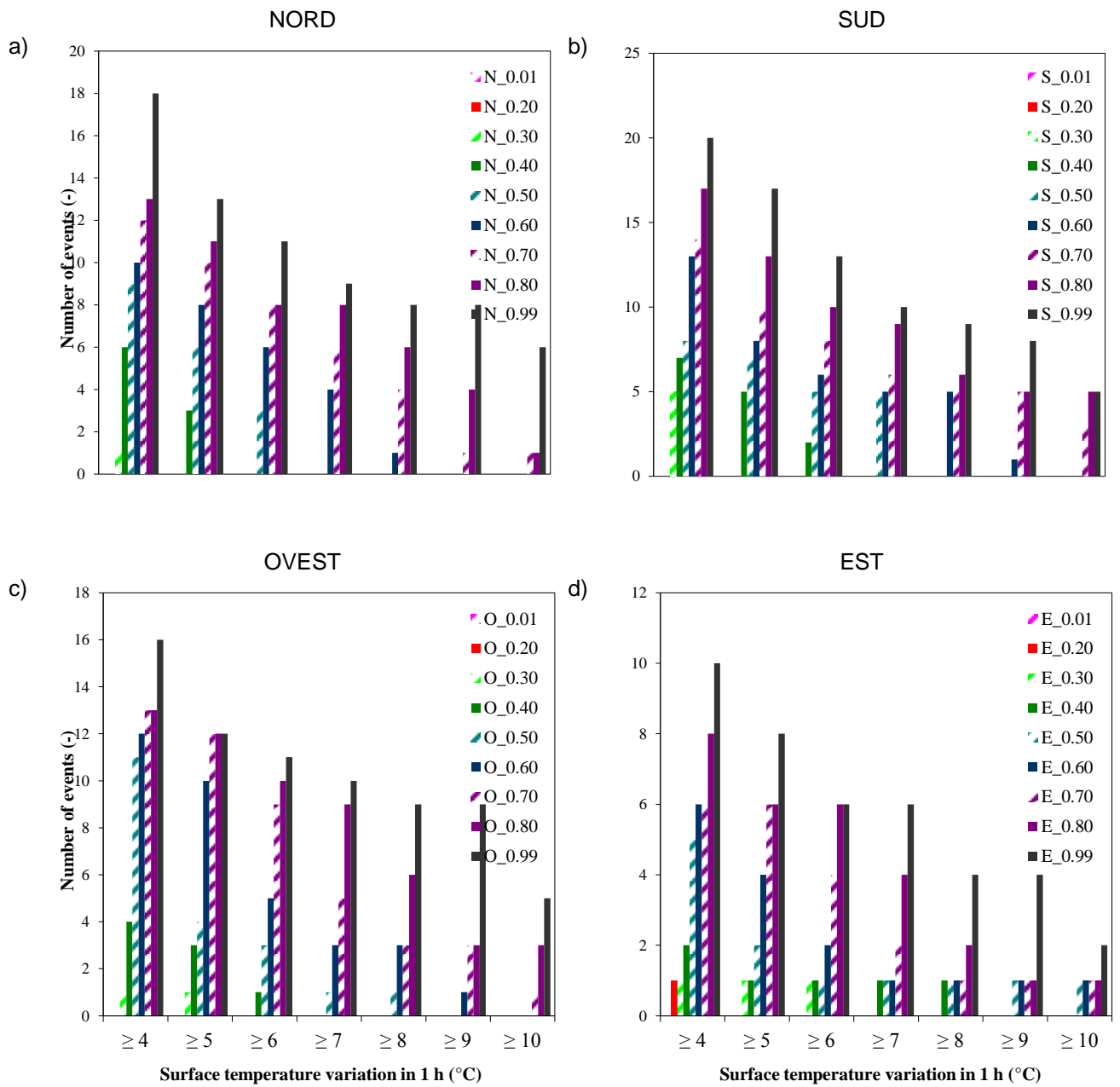
h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≥ 4	0	0	5	7	8	13	14	17	20
≥ 5	0	0	0	5	7	8	10	13	17
≥ 6	0	0	0	2	5	6	8	10	13
≥ 7	0	0	0	0	5	5	6	9	10
≥ 8	0	0	0	0	0	5	5	6	9
≥ 9	0	0	0	0	0	1	5	5	8
≥ 10	0	0	0	0	0	0	3	5	5

Allegato B

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	1	4	11	12	13	13	16
≥ 5	0	0	1	3	4	10	12	12	12
≥ 6	0	0	0	1	3	5	9	10	11
≥ 7	0	0	0	0	1	3	5	9	10
≥ 8	0	0	0	0	1	3	3	6	9
≥ 9	0	0	0	0	0	1	3	3	9
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	3	5

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Estate								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	1	1	2	5	6	6	8	10
≥ 5	0	0	1	1	2	4	6	6	8
≥ 6	0	0	1	1	1	2	4	6	6
≥ 7	0	0	0	1	1	1	2	4	6
≥ 8	0	0	0	1	1	1	1	2	4
≥ 9	0	0	0	0	1	1	1	1	4
≥ 10	0	0	0	0	1	1	1	1	2

Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto





Allegato B

**$\Delta T$  e Pioggia e Temperatura Superficiale  $\geq 40^\circ\text{C}$**

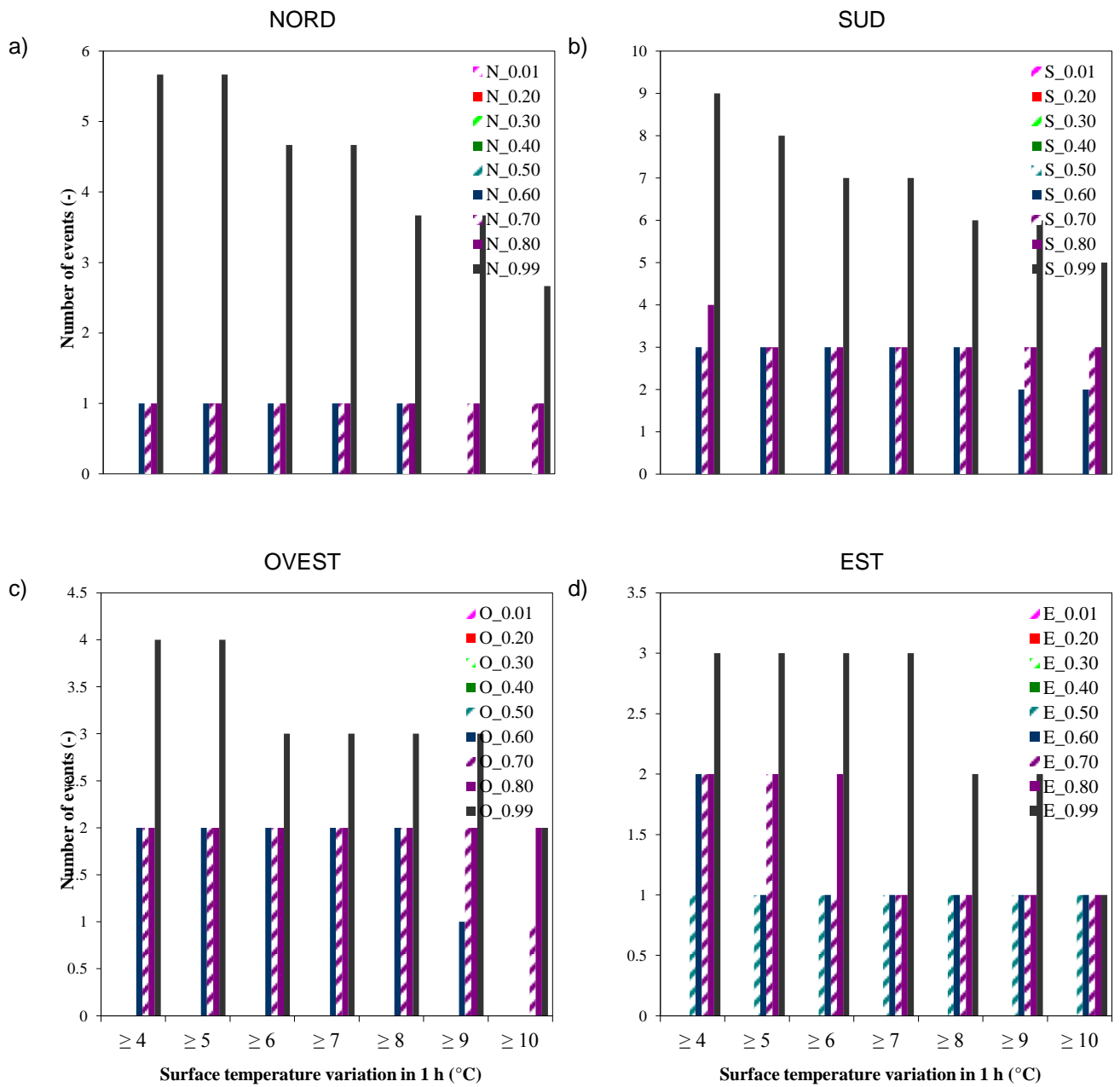
h/anno Limiti	Roma_ $\Delta T$ & Pioggia & Tsup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	0	1	1	1	6
$\geq 5$	0	0	0	0	0	1	1	1	6
$\geq 6$	0	0	0	0	0	1	1	1	5
$\geq 7$	0	0	0	0	0	1	1	1	5
$\geq 8$	0	0	0	0	0	1	1	1	4
$\geq 9$	0	0	0	0	0	0	1	1	4
$\geq 10$	0	0	0	0	0	0	1	1	3

h/anno Limiti	Roma_ $\Delta T$ & Pioggia & Tsup $\geq 40^\circ\text{C}$								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
$\geq 4$	0	0	0	0	0	3	3	4	9
$\geq 5$	0	0	0	0	0	3	3	3	8
$\geq 6$	0	0	0	0	0	3	3	3	7
$\geq 7$	0	0	0	0	0	3	3	3	7
$\geq 8$	0	0	0	0	0	3	3	3	6
$\geq 9$	0	0	0	0	0	2	3	3	6
$\geq 10$	0	0	0	0	0	2	3	3	5

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≥ 4	0	0	0	0	0	2	2	2	4
≥ 5	0	0	0	0	0	2	2	2	4
≥ 6	0	0	0	0	0	2	2	2	3
≥ 7	0	0	0	0	0	2	2	2	3
≥ 8	0	0	0	0	0	2	2	2	3
≥ 9	0	0	0	0	0	1	2	2	3
≥ 10	0	0	0	0	0	0	1	2	2

h/anno Limiti	Roma_ΔT&Pioggia&Tsup ≥ 40°C								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≥ 4	0	0	0	0	1	2	2	2	3
≥ 5	0	0	0	0	1	1	2	2	3
≥ 6	0	0	0	0	1	1	1	2	3
≥ 7	0	0	0	0	1	1	1	1	3
≥ 8	0	0	0	0	1	1	1	1	2
≥ 9	0	0	0	0	1	1	1	1	2
≥ 10	0	0	0	0	1	1	1	1	1



*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

**ΔT Classi di temperature**

h/anno Limiti	Roma_ΔT Classi di Temperature								
	N_0.01	N_0.20	N_0.30	N_0.40	N_0.50	N_0.60	N_0.70	N_0.80	N_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0 - 5	353	340	329	323	322	319	313	310	304
5 - 10	1592	1465	1432	1401	1373	1351	1340	1329	1305
10 - 15	2221	2075	2008	1955	1892	1844	1774	1718	1654
15 - 20	2150	2072	1984	1912	1859	1789	1754	1730	1655
20 - 25	1506	1544	1566	1564	1534	1485	1457	1416	1331
25 - 30	823	877	912	924	923	946	944	921	902
30 - 35	109	372	486	544	624	673	694	705	674
35 - 40	0	9	38	129	220	315	378	447	558
40 - 45	0	0	0	2	8	33	98	164	282
45 - 50	0	0	0	0	0	0	3	15	85
50 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	4
55 - 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 - 70	0	0	0	0	0	0	0	0	0

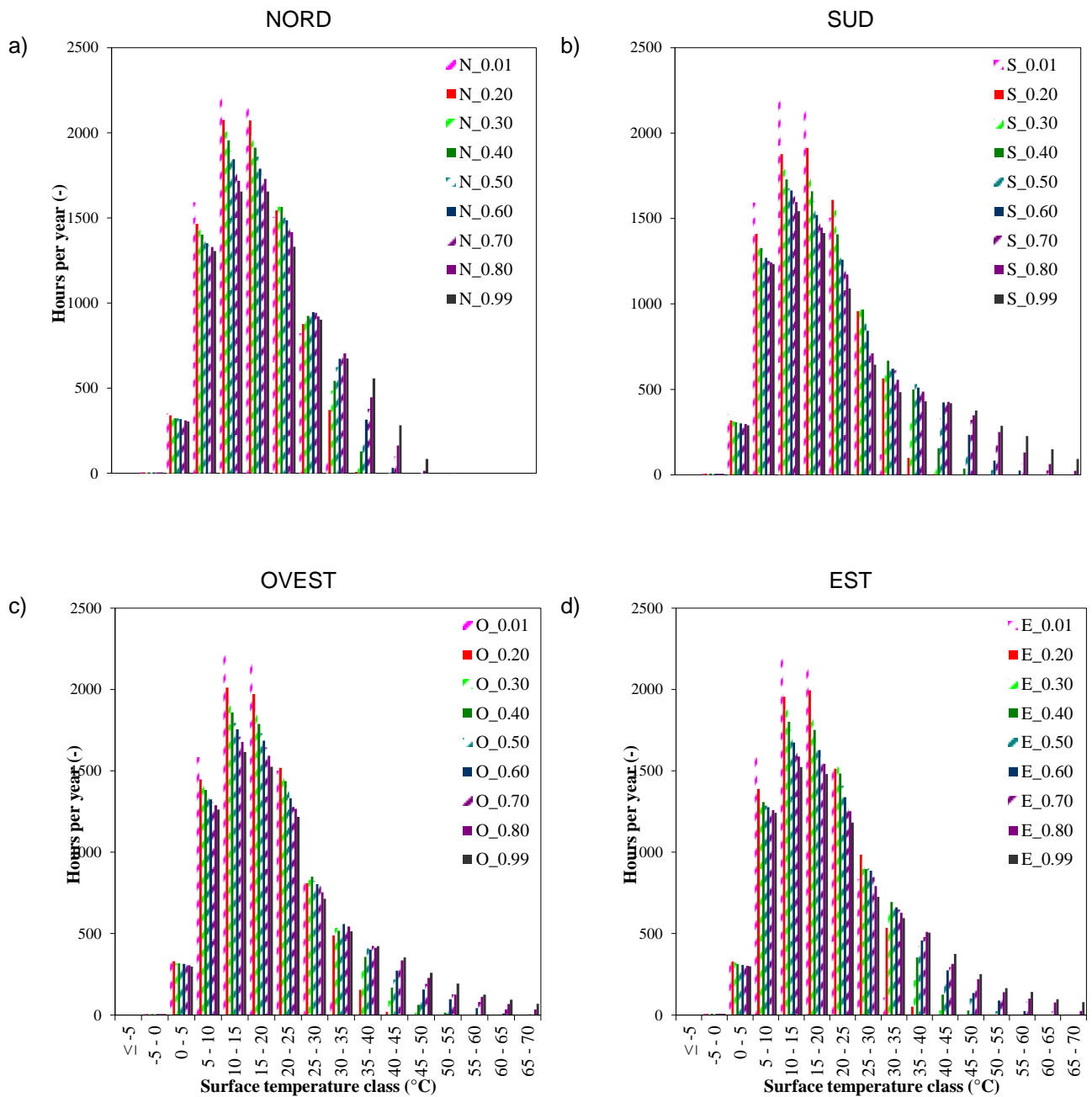
h/anno Limiti	Roma_ΔT Classi di temperature								
	S_0.01	S_0.20	S_0.30	S_0.40	S_0.50	S_0.60	S_0.70	S_0.80	S_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	7	7	7	7	6	6	6	6	6
0 - 5	356	318	313	307	302	300	300	297	290
5 - 10	1592	1411	1369	1326	1297	1270	1251	1243	1233
10 - 15	2198	1877	1788	1728	1677	1664	1629	1596	1542
15 - 20	2151	1913	1748	1660	1602	1521	1478	1446	1415
20 - 25	1504	1609	1549	1407	1321	1260	1214	1172	1090
25 - 30	833	959	984	967	898	843	748	711	645
30 - 35	119	564	642	669	658	620	611	556	483
35 - 40	0	99	305	499	531	510	513	487	431
40 - 45	0	4	53	155	331	424	422	426	419
45 - 50	0	0	2	36	110	234	321	347	377
50 - 55	0	0	0	0	28	83	174	251	287
55 - 60	0	0	0	0	0	25	65	131	227
60 - 65	0	0	0	0	0	1	25	62	150
65 - 70	0	0	0	0	0	0	3	23	93

Allegato B

h/anno Limiti	Roma_Classi di Temperatura								
	O_0.01	O_0.20	O_0.30	O_0.40	O_0.50	O_0.60	O_0.70	O_0.80	O_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0 - 5	350	331	319	317	315	314	308	305	298
5 - 10	1585	1448	1431	1382	1352	1324	1307	1288	1262
10 - 15	2210	2011	1913	1859	1794	1755	1710	1677	1615
15 - 20	2159	1971	1862	1788	1732	1685	1643	1593	1525
20 - 25	1502	1519	1482	1438	1396	1331	1278	1267	1216
25 - 30	817	810	832	851	825	804	793	754	714
30 - 35	131	489	536	517	520	558	555	544	514
35 - 40	0	156	275	357	409	402	424	413	423
40 - 45	0	19	89	169	218	273	287	336	353
45 - 50	0	1	15	63	125	157	192	228	260
50 - 55	0	0	1	14	55	97	127	126	193
55 - 60	0	0	0	1	11	42	81	112	125
60 - 65	0	0	0	0	3	9	36	67	93
65 - 70	0	0	0	0	0	4	9	34	69

h/anno Limiti	Roma_ΔT Classi di Temperature								
	E_0.01	E_0.20	E_0.30	E_0.40	E_0.50	E_0.60	E_0.70	E_0.80	E_0.99
≤ -5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5 - 0	7	7	7	7	7	7	7	7	7
0 - 5	362	329	321	313	308	307	305	302	300
5 - 10	1589	1389	1336	1308	1286	1277	1268	1258	1242
10 - 15	2193	1955	1877	1802	1752	1673	1618	1587	1522
15 - 20	2155	1995	1844	1751	1667	1628	1587	1543	1480
20 - 25	1510	1514	1527	1484	1410	1338	1293	1253	1183
25 - 30	836	985	955	896	899	886	848	793	725
30 - 35	109	536	649	694	678	661	649	628	594
35 - 40	0	51	215	354	426	458	479	510	506
40 - 45	0	0	29	125	201	275	294	314	376
45 - 50	0	0	0	27	102	135	192	219	251
50 - 55	0	0	0	0	24	89	112	141	165
55 - 60	0	0	0	0	1	24	82	101	141
60 - 65	0	0	0	0	0	2	25	77	97
65 - 70	0	0	0	0	0	0	2	25	80

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*



# BIBLIOGRAFIA

## Libri e pubblicazioni

- Künzel H.M. - *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. - One- and two-dimensional calculation using simple parameters.* - IRB Verlag - (1995)
- Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. - *Moisture in exposed building components.* - International Symposium on Moisture Problems in Building Walls - Porto, 11.-13. Sept. 1995
- Künzel, H.M., Kießl, K.: *Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components.* - International Journal of heat and mass transfer 40 (1997)
- Künzel, H.M. - *Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls.* - Materials and Structures 31 (1998)
- Holm, A., H.M Künzel,. - *Combined Effect of Temperature and Humidity on the Deterioration Process of Insulation Materials in ETICS.* - Proceedings 5th Symposium "Building Physics in the Nordic Countries" - Göteborg 1999
- Martin Krus – *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials – Theoretical Principles and New Test Methods* – Fraunhofer Institute for Building Physics
- Martin Krus, Andreas Holm – *Simple methods to approximate the liquid transport coefficients describing the absorption and drying* – Göteborg – 1999
- Hugo Hens, Jan Carmeliet – *Performance Prediction for Masonry Wall with EIFS Using Calculation Procedures and Laboratory Testing* – Journal of Thermal Envelope and Building Science – 2002
- A. Holm, H. M. Künzel – *Two-Dimensional Transient Heat and Moisture Simulations of Rising Damp with WUFI 2-D* – Fraunhofer Institute for Building Physics
- Bruno Daniotti – *La durabilità in edilizia* – Cusl – 2005
- Bruno Daniotti – *La qualità dei prodotti per l'edilizia – Dispense delle lezioni AA 2002-2003*

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

- Bruno Daniotti – *La valutazione della durabilità di pareti perimetrali verticali non portanti* – 2006
- Bruno Daniotti, Fulvio Re Cecconi, Riccardo Paolini, Rosanno Galliano, Jessica Ferrer, Luca Battaglia – *Failure modes of ETICS: analysis of case studies and hygrothermal modelling to assess the frequency of critical stress conditions* – Coimbra - 2012
- Hartwig M. Künzel – *Building physics and durability* – XII DBMC International Conference – Porto 12-15 Aprile 2011
- Hartwig M. Künzel – *Specific building-physical properties of ETICS on mineral-wool basis* – IBP report HTB-20/2009
- Toni Pakkala, Jommi Suonketo – *Hygrothermal behavior testing of external thermal insulation composite systems with rendering in Nordic climate* - XII DBMC International Conference – Porto 12-15 Aprile 2011
- Hans Janssen – *Thermal diffusion of water vapour in porous material: a critical review* - XII DBMC International Conference – Porto 12-15 Aprile 2011
- Bruno Daniotti, Sonia Lupica Spagnolo, Riccardo Paolini – *Climatic data analysis to define accelerated ageing for Reference Service Life Evaluation* - XI DBMC International Conference – Istanbul 11-14 Maggio 2011
- Hans Janssen – *The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground* - Katholieke Universiteit Leuven
- John Straube, Eric Burnett – *Review of modeling methods for building enclosure design* – University of Waterloo – Canada 2002
- Martin Krus, K. Kießl – *Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials* – “Materials and Structures” scientific report – 1997
- M. Kehrer, Hartwig M. Künzel – *Ecological Insulation Materials – Does Sorption Moisture affect their Insulation Performance?* - Journal of Thermal Envelope and Building Science, 3 - Fraunhofer Institute for Building Physics – Gennaio 2003

Normativa di riferimento

- UNI EN ISO 6946 – Componenti ed elementi per l’edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo – 1999
- UNI EN 8290-1 + A122:1983 – Edilizia residenziale – Sistema tecnologico – Classificazione e terminologia – 1981
- UNI EN 8290-2 – Edilizia residenziale – Sistema tecnologico – Analisi dei requisiti – 1983
- UNI EN 8290-3 – Edilizia residenziale – Sistema tecnologico – Analisi degli agenti – 1987
- UNI EN 10077-1 – Prestazione termica di finestre, porte e chiusure – Calcolo della trasmittanza (metodo semplificato) – 2002



## *Bibliografia*

- UNI EN 10351 – Materiali da costruzione – Conduttività termica e permeabilità al vapore – 1994
- UNI EN 10355 – Murature e solai – Valori della trasmittanza termica e metodo di calcolo – 1994
- UNI 10723 – Processo edilizio – Classificazione e definizione delle fasi processuali degli interventi edilizi di nuova costruzione – 1998
- UNI 10838 – Edilizia – Terminologia riferita all’utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia – 1999
- UNI 11156-1 – Valutazione della durabilità dei componenti edilizi – Parte 1: Terminologia e definizione dei parametri di valutazione – 2006
- UNI 11156-2 – Valutazione della durabilità dei componenti edilizi – Parte 2: Metodo per la valutazione della propensione all’affidabilità – 2006
- UNI 11156-3 – Valutazione della durabilità dei componenti edilizi – Parte 3: Metodo per la valutazione della durata (vita utile) – 2006
- UNI EN 12086 – Isolanti termici per l’edilizia – Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore acqueo – 1999
- UNI EN 12524 – Materiali e prodotti per l’edilizia – Proprietà igrometriche – Valori tabulati di progetto – 2001
- UNI EN 12570 – Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per l’edilizia – Determinazione del contenuto di umidità mediante essiccamento ad alta temperatura - 2001
- UNI EN 12571 – Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per l’edilizia – Determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico – 2001
- UNI EN 12572 - Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per l’edilizia – Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore d’acqua - 2006
- UNI EN ISO 13788 – Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l’umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodo di calcolo – 2003
- ISO 15686-1 – Buildings and constructed assets – Service Life planning – Part 1: general principles – 2001
- ISO 15686-2 – Buildings and constructed assets – Service Life planning – Part 2: Service Life Prediction Procedures – 2001
- ISO 15686-3 – Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 3: Performance Audits and Reviews – 2002
- ISO 15686-5 – Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle Costing – 2008
- ISO 15686-6 – Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 6: Procedures for considering Enviromental Impacts – 2004

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

- ISO 15686-7 – Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practise – 2006
- ISO 15686-8 – Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 8: Reference Service Life and Service Life Estimation. – 2008
- ISO 15148 – Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per l'edilizia – Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per immersione parziale – 2003
- ETAG 004 – Guideline for European Technical Approval of external thermal insulation composite systems with rendering – Edizione Marzo 2000
- ETAG 014 – Guideline for European Technical Approval of plastic anchors for fixing of external thermal insulation composite systems with rendering – Edizione Gennaio 2002
- IEA ANNEX 24 – Heat, Air and Moisture transfer in insulated envelope parts
- Direttiva Prodotti da Costruzione CEE 106/89
- D.Lgs. 192/2005
- D.Lgs 311/2006
- Manuale di posa Cortexa – Consorzio produttori del cappotto di qualità -

Siti internet

- <http://www.tbz.bz/>
- [http://www.wufi.de/index\\_e.html](http://www.wufi.de/index_e.html)
- [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)
- <http://www.fe.up.pt/12dbmc/porto>

## Indice delle Figure

Figura 1 : Andamento livelli prestazionali (esemplificativo)	18
Figura 2 : Metodo di valutazione della durabilità dei component edilizi	19
Figura 3 : Densità di probabilità relative alla vita utile	21
Figura 4 : Valutazione della vita utile di riferimento	23
Figura 5: accelerazione di un tempo di invecchiamento, escludendo le parti non responsabili dell'invecchiamento, per un periodo di un anno.	29
Figura 6: ciclo annuale di gelo e disgelo in Finlandia tra il 1961 e il 2006	31
Figura 7: meccanismi di penetrazione della pioggia	33
Figura 8: pioggia battente. ritardo di tempo prima che inizi il drenaggio per un intonaco a base polimerica	34
Figura 9 : Tipologia infiltrazioni d'acqua	38
Figura 10: Diagramma della moisture storage function di un materiale igroscopico.	39
Figura 11 : Comportamento dell'acqua all'interno dei pori di un materiale	39
Figura 12: Dipendenza del coefficiente di trasporto capillare per aspirazione nel contenuto d'acqua e coefficiente di penetrazione dell'acqua per i materiali da costruzione, determinato attraverso.	46
Figura 13 : Relazione raggio dei pori – temperature di congelamento	48
Figura 14 : Esempio di andamento delle temperature superficiali esportato da WUFI	56
Figura 15 : Esempio di andamento del contenuto d'acqua esportato da WUFI	59
Figura 16 : Città Sud Europa analizzate	61
Figura 17 : Esempio di schermata di analisi di un clima con software WUFI	64
Figura 18 : I grafici 3.a e 3.b indicano le frequenze di temperature superficiali orarie per gli orientamenti Nord e Sud, il grafico 3.c riporta i valori di temperatura esterna oraria, il grafico 3.d riporta i valori di umidità relativa esterna oraria.	73
Figura 19 : Città Sud Europa analizzate	74
Figura 20 : I grafici 5.a e 5.b riportano le frquenze delle differenze di temperature esterne superficiali nei periodi estivi e invernali per le esposizioni Nord e Sud, i grafici 5.c e 5.d riportano il confronto tra dati M.Norm e WUFI per le frequenze di temperature esterne superficiali.	83
Figura 21 : Confronto dati umidità relativa WUFI – M.NORD	84
Figura 22 : Grafici per l'esposizione Nord della città di Barcellona	86
Figura 23 : Grafici per l'esposizione Sud della città di Barcellona	87
Figura 24: Città italiane analizzate	88
Figura 25: Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C	92

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di  
frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Figura 26 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C quando sta piovendo	95
Figura 27 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, durante il periodo estivo.	98
Figura 28: Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, quando la Temperatura Superficiale è $\geq 40^\circ\text{C}$	101
Figura 29: Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS è compresa nelle classi di temperature di 5°C, per le varie esposizioni e assorbanze solari	105
Figura 30 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C	109
Figura 31 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C quando sta piovendo	112
Figura 32 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, durante il periodo estivo.	115
Figura 33 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS cambia in 1 h più di 4°C, 5°C, fino a 10°C, quando la Temperatura Superficiale è $\geq 40^\circ\text{C}$	118
Figura 34 : Numero di ore anno in cui la Temperatura superficiale di un ETICS è compresa nelle classi di temperature di 5°C, per le varie esposizioni e assorbanze solari	122
Figura 35: somma irraggiamento e pioggia verticale a Milano. WUFI dati METEONORM	123
Figura 36: numero di eventi orari in cui il contenuto d'acqua ricade in un determinato step di contenuto d'acqua.	126
Figura 37 : numero di eventi orari in cui il contenuto d'acqua ricade in un determinato step di contenuto d'acqua.	128
Figura 38 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare $\alpha=0,2$ e $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Nord	130
Figura 39 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare $\alpha=0,2$ e $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Sud	132
Figura 40 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare $\alpha=0,2$ e $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Ovest	134
Figura 41 : Differenze degli shock termici tra EPS e Lana Minerale per i coefficienti di assorbimento solare $\alpha=0,2$ e $\alpha = 0,8$ , per l'esposizione Est	136
Figura 42 : Confronto contenuti d'acqua per gli strati di intonaco e per lo strato isolante, coefficient di assorbimento solare $\alpha=0,3$ e $\alpha = 0,7$ , per l'esposizione Nord, città di Milano	138
Figura 43 : Confronto contenuti d'acqua per gli strati di intonaco e per lo strato isolante, coefficient di assorbimento solare $\alpha=0,3$ e $\alpha = 0,7$ , per l'esposizione Sud, città di Milano	139
Figura 44 : Calcolo del contenuto totale d'acqua in una muratura senza isolante esterno (curva nera), con ETICS in lana minerale (grigio scuro) e EPS (grigio chiaro) in tre differenti località con climi caldi	142

## Indice delle tabelle

Tabella 1: Anni di vita utile per alcune categorie di edifici	24
Tabella 2 : Vita utile di progetto per elementi tecnici	24
Tabella 3 : Lista delle città e relativi dati; a.n.d. = anno non disponibile ma dato presente, n.d. = dati non disponibili perchè non presenti.	62
Tabella 4 : Proprietà materiali ETICS	63
Tabella 5 : Dati Temperature Italia e Spagna	66
Tabella 6 : Dati Umidità Relativa Italia e Spagna	67
Tabella 7 : Dati Temperature Città Sud Europa	68
Tabella 8 : Dati Umidità Città Sud Europa	69
Tabella 9 : Dati Temperature Superficiali Italia Spagna – Nord	70
Tabella 10 : Dati Temperature Superficiali Italia Spagna – Sud	70
Tabella 11 : Dati Temperature Superficiali Città Sud Europa – Nord	71
Tabella 12 : Dati Temperature Superficiali Città Sud Europa – Sud	72
Tabella 13 : Lista delle città e relativi dati; a.n.d. = anno non disponibile ma dato presente, n.d. = dati non disponibili perchè non presenti.	75
Tabella 14 : Proprietà materiali ETICS	76
Tabella 15 : Dati temperature M.NORM	77
Tabella 16 : Dati umidità relativa	78
Tabella 17 : Dati temperature esposizione Nord per il periodo di 1 anno	79
Tabella 18 : Dati temperature esposizione Sud per il periodo di 1 anno	79
Tabella 19 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione invernale	80
Tabella 20 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione invernale	80
Tabella 21 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione estiva	81
Tabella 22 : Frequenze shock termici superficiali città – Nord/Sud condizione estiva	81
Tabella 23 : Proprietà materiali ETICS	85
Tabella 24 : Proprietà materiali ETICS	89
Tabella 25: Milano_ $\Delta T$ _Nord MW	90
Tabella 26: Milano_ $\Delta T$ _Sud MW	90
Tabella 27: Milano_ $\Delta T$ _Ovest MW	91
Tabella 28: Milano_ $\Delta T$ _Est MW	91
Tabella 29: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Nord MW	93
Tabella 30: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Sud MW	93

*Sistemi di isolamento termico esterno a cappotto: modellazioni igrotermiche di frequenza e intensità di eventi critici per lo sviluppo di modi di guasto*

Tabella 31: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Ovest MW	94
Tabella 32: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Est MW	94
Tabella 33: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Nord MW	96
Tabella 34: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Sud MW	96
Tabella 35: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Ovest MW	97
Tabella 36: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Est MW	97
Tabella 37: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Nord MW	99
Tabella 38: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Sud MW	99
Tabella 39: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Ovest MW	99
Tabella 40: Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Est MW	100
Tabella 41: Milano_ $\Delta T$ Classi di temperature_Nord MW	102
Tabella 42: Milano_ $\Delta T$ Classi di temperature_Sud MW	103
Tabella 43: Milano_ $\Delta T$ Classi di temperature_Ovest MW	103
Tabella 44: Milano_ $\Delta T$ Classi di temperature_Est MW	104
Tabella 45 : Proprietà materiali ETICS	106
Tabella 46 : Milano_ $\Delta T$ _Nord EPS	107
Tabella 47 : Milano_ $\Delta T$ _Sud EPS	107
Tabella 48 : Milano_ $\Delta T$ _Ovest EPS	108
Tabella 49 : Milano_ $\Delta T$ _Est EPS	108
Tabella 50 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Nord EPS	110
Tabella 51 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Sud EPS	110
Tabella 52 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Ovest EPS	111
Tabella 53 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia_Est EPS	111
Tabella 54 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Nord EPS	113
Tabella 55 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Sud EPS	113
Tabella 56 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Ovest EPS	113
Tabella 57 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Estate_Est EPS	114
Tabella 58 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Nord EPS	116
Tabella 59 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Sud EPS	116
Tabella 60 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Ovest EPS	116
Tabella 61 : Milano_ $\Delta T$ &Pioggia&Alte temperature_Est EPS	117
Tabella 62 : Milano_ $\Delta T$ Classi di temperature_Nord EPS	119
Tabella 63 : Milano_ $\Delta T$ Classi di temperature_Sud EPS	119

Tabella 64 : Milano_ΔT Classi di temperature_Ovest EPS	120
Tabella 65 : Milano_ΔT Classi di temperature_Est EPS	120
Tabella 66: numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per lo strato superficiale di intonaco STO SILCO sp. 0,002 m per l'esposizione Nord e Sud.	124
Tabella 67: numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per lo strato superficiale di intonaco STO LEVELL UNI sp. 0,005 m per l'esposizione Nord e Sud.	124
Tabella 68: numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per l'isolante in lana minerale ad alta densità sp. 0,018 m ρ=155 kg/m <sup>3</sup> per l'esposizione Nord e Sud	125
Tabella 69: numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per l'isolante in lana minerale a bassa densità sp. 0,082 m ρ=80 kg/m <sup>3</sup> per l'esposizione Nord e Sud	125
Tabella 70 : numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per lo strato superficiale di intonaco STO SILCO sp. 0,002 m per l'esposizione Nord e Sud.	127
Tabella 71 : numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per lo strato superficiale di intonaco STO LEVELL UNI sp. 0,005 m per l'esposizione Nord e Sud.	127
Tabella 72 . numero di ore di superamento dei limiti del quantitativo d'acqua [kg/m <sup>3</sup> ] per l'isolante in EPS sp. 0,1 m ρ=80 kg/m <sup>3</sup> per l'esposizione Nord e Sud	127
Tabella 73 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Nord	129
Tabella 74 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Sud	131
Tabella 75 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Ovest	133
Tabella 76 : Confronto valori shock termici EPS/Lana Minerale, esposizione Est	135