



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
TESI DI LAUREA MAGISTRALE
IN INGEGNERIA ENERGETICA

ANALISI ENERGETICA ED
ECONOMICA SULL'UTILIZZO DI
BIOMASSE LEGNOSE PER IL
RISCALDAMENTO DI EDIFICI
RESIDENZIALI

Relatore: Prof. De Carli Michele

Tesista: Bigarella Giovanni

Matricola: 1013247

Anno accademico: 2012 – 2013

SOMMARIO

1. IL LEGNO.....	7
1.1 Caratteristiche istologiche e strutturali.....	8
1.2 Durame e Alburno.....	11
1.3 Nodi.....	13
1.4 Colore.....	14
1.5 Odore e sapore.....	15
1.6 Rapporti massa/volume.....	15
1.7 Relazioni tra legno ed acqua.....	18
1.8 Perché essiccare.....	22
1.8.1 Conseguenze dei “movimenti” dovuti alle variazioni dell’umidità nelle tavole.....	23
2. GLI ISOLANTI NATURALI.....	24
2.1 Classificazione dei materiali isolanti.....	26
2.2 Proprietà e prestazioni degli isolanti in architettura.....	29
2.2.1 Comportamento termico in regime stazionario e variabile.....	30
2.2.2 Comportamento termoigrometrico.....	32
2.2.3 Comportamento acustico.....	33
2.2.4 Comportamento al fuoco.....	35
2.2.5 Comportamento in presenza d’acqua.....	36
2.2.6 Comportamento a compressione.....	37
2.3 Modalità di intervento.....	38
2.3.1 Isolamento applicato dall’interno.....	38
2.3.2 Isolamento applicato dall’esterno.....	39
2.4 Certificazione e etichette degli isolanti.....	39
2.5 Fissaggio.....	41
2.6 Bilancio ecologico.....	41
2.7 Ciclo di vita e fattori a rischio.....	46
2.7.1 Approvvigionamento delle materie prime.....	47
2.7.2 Processo produttivo.....	49
2.7.3 Lavorazioni e messa in opera.....	53
2.7.4 Esercizio.....	54
2.7.5 Dismissione.....	55
2.8 Gli isolanti a base di legno.....	58
2.8.1 Gli isolanti in fibra di legno.....	59
2.8.2 Gli isolanti in Fibra di Legno Mineralizzata.....	66
3. IL PELLET.....	73

3.1	Fasi di lavorazione.....	74
3.1.1	Acquisizione materia prima	74
3.1.2	Movimentazione.....	75
3.1.3	Triturazione	75
3.1.4	Essiccazione	76
3.1.5	Deferrizzazione	77
3.1.6	Macinazione	77
3.1.7	Pellettatura o pellettizzazione	78
3.1.8	Depolverizzazione	80
3.1.9	Confezionamento.....	80
3.2	Qualità del pellet	82
3.3	Formula semplificata per il calcolo del fabbisogno annuale di pellet	88
3.4	Combustione e fumi	89
4.	SIMULAZIONI CON SOFTWARE ECODOMUS	91
4.1	Software Ecodomus.....	91
4.2	Descrizione sintetica dell'abitazione in esame	96
4.3	Casi di studio.....	97
4.3.1	Caso 0: Caso di riferimento: Nessuna miglioria, ne edilizia ne impiantistica	99
4.3.2	Caso 1: Caldaia a Pellet + Valvole Termostatiche	102
4.3.3	Caso 2: Isolamento termico + Valvole Termostatiche	108
4.3.4	Caso 3: Caldaia a pellet + Isolamento termico + Valvole Termostatiche	112
4.3.5	Caso 4: Isolamento termico + Caldaia a condensazione + Valvole termostatiche + Solare termico	115
4.3.6	Caso 5: Isolamento termico + Pompa di calore + Valvole termostatiche + Solare termico	122
4.4	Casi di studio Zona climatica F.....	128
4.5	Calcoli Zona climatica E	128
4.5.1	Energia Primaria per il Riscaldamento	128
4.5.2	Energia Primaria per Acqua Calda Sanitaria (ACS)	130
4.5.3	Energia Primaria Totale	132
4.5.4	Fabbisogno di pellet e Alberi Equivalenti	132
4.5.5	Quantità di Isolante e Alberi Equivalenti	136
4.5.6	Consumo di Alberi Totale.....	137
4.5.7	CO ₂ e relativi grafici.....	138
4.5.8	Risultati conclusivi	141
4.6	Calcoli Zona climatica F.....	144
4.6.1	Energia Primaria per il riscaldamento	144
4.6.2	Energia Primaria per l'ACS	145

4.6.3	Energia Primaria Totale	145
4.6.4	Fabbisogno di pellet e Alberi equivalenti	145
4.6.5	Quantità di isolante e Alberi Equivalenti.....	146
4.6.6	Consumo di Alberi Totale.....	146
4.6.7	CO2 e relativi grafici	147
4.6.8	Risultati conclusivi	150
4.7	Conclusioni	151
5.	CONTO ECONOMICO.....	152
5.1	Investimenti.....	153
5.1.1	Costo Caso 1: Istallazione Caldaia a Pellet e Valvole Termostatiche.....	153
5.1.2	Costo Caso 2: Istallazione Isolamento termico e Valvole Termostatiche	153
5.1.3	Costo Caso 3: Istallazione Caldaia a Pellet + Isolamento termico + Valvole Termostatiche.....	154
5.2.4	Costo Caso 4: Istallazione Isolamento termico + Caldaia a condensazione + Valvole termostatiche + Solare termico.....	155
5.1.5	Costo Caso 5: Istallazione Isolamento termico + Pompa di Calore + Valvole Termostatiche + Solare Termico	156
5.2	Conto Economico.....	157
5.2.1	Zona Climatica E.....	158
5.2.2	Zona Climatica F.....	158
5.3	Valore Attuale Netto – VAN	159
5.3.1	Grafici VAN zona climatica E	160
5.3.2	Grafici VAN zona climatica F	162
5.3.3	Conclusioni	165
6.	NORMATIVE.....	166
7.	APPROFONDIMENTI	171
7.1	Energia solare e fotosintesi	171
7.2	Metodo di Glaser	172
7.3	EPD.....	173
8.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	174
	RINGRAZIAMENTI	177

1. II LEGNO

Le piante perenni sono caratterizzate dalla presenza di fusto e rami che crescono concentricamente verso l'esterno di anno in anno e dall' avere i tessuti composti essenzialmente da cellulosa, emicellulosa e lignina. Il legno può avere diversi nomi, a seconda dell'uso a cui è destinato:

- *legna* se fornisce combustibile
- *legname da lavoro, costruzione*, se indirizzato verso tali impieghi.

Il legno è prodotto dalla pianta come elemento strutturale, dalle ottime caratteristiche di robustezza e resistenza, ed è per questo impiegato utilmente dall'uomo. Come già accennato, il legno è costituito da fibre di *cellulosa* trattenute da una matrice di *lignina*.

Una volta tagliato e stagionato od essiccato, il legno è destinato ad un'ampia varietà di utilizzi:

- Scomposto in fibre dà origine alla polpa di legno, impiegata per produrre la carta
- Può essere scolpito e lavorato con appositi utensili
- È stato un importante materiale da costruzione fin dalle origini dell'umanità, quando l'uomo iniziò a costruirsi i propri ripari e tuttora in uso
- È impiegato come combustibile per il riscaldamento e la cucina
- È impiegato per la produzione della carta, tramite la produzione di polpa di cellulosa, avendo sostituito nell'era industriale il cotone o altre piante, più ricche di cellulosa ma meno abbondanti e quindi meno adatte ai nuovi regimi di produzione

Senza addentrarsi in particolari di carattere botanico è necessario ricordare che in base ai caratteri dei fiori e dei frutti, gli alberi possono venire raggruppati in due grandi suddivisioni:

- *Gimnosperme*: a cui appartengono le Conifere quali ad esempio pino o abete;
- *Angiosperme*: comunemente indicate come Latifoglie a cui appartengono querce, faggi pioppi ecc.

Faremo quindi riferimento a legni di Conifere e legni di Latifoglie.

In inglese tali legni vengono indicati rispettivamente con i termini "Softwood" per le conifere, e "Hardwood" per le latifoglie, portando quindi a considerare i primi come legni teneri e i secondi come legni duri. In realtà questa suddivisione può essere fuorviante, poiché alcuni legni duri sono più teneri di quelli definiti teneri, mentre alcuni teneri sono più duri dei duri, ma la traduzione in legno tenero e legno duro è un errore di ipercorrettismo, visto che le due parole inglesi stanno a significare semplicemente - e rispettivamente - conifere e latifoglie.

La denominazione scientifica degli alberi, o *specie legnose*, è sistematicamente impostata sull'uso di binomi di nomi latini dei quali il primo indica il *Genere*, gerarchicamente

superiore al secondo che indica la *Specie*. Ovviamente un genere può comprendere svariate specie.

Le denominazioni latine sono valide per tutto il mondo, ma è chiaro che nel commercio e negli usi correnti ci si servirà invece dei nomi volgari, differenti da Paese a Paese, anzi addirittura da una località all'altra. Per avere modo di identificare con precisione un determinato legno ogni Paese ha stabilito una lista di nomi unificati, ognuno dei quali corrisponde ad un dato binomio latino, ed è alle indicazioni di tale lista che ci si dovrà sempre riferire: Per l'Italia vedasi i fascicoli UNI 2853 (Specie legnose nazionali), UNI 2854 (Specie esotiche coltivate in Italia), UNI 3917 (Specie esotiche importate).

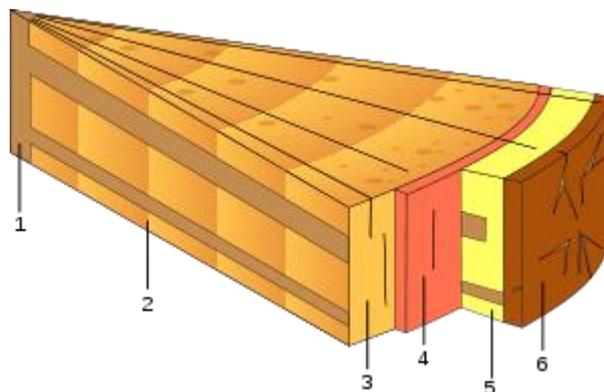
Il legno proveniente da specie differenti ha diverso colore, diversa densità e diverse caratteristiche della venatura. A causa di queste differenze e ai differenti tassi di crescita, i differenti tipi di legno presentano differenti qualità e valore. Per esempio il *Mogano* vero (*Swietenia mahogani*), denso e scuro, è ottimo per gli intarsi e le finiture raffinate, mentre la *Balsa*, leggera, soffice, dalla consistenza spugnosa facilmente intagliabile, è usato nella realizzazione di modellini.

I nemici naturali del legno sono i funghi e gli insetti.

1.1 Caratteristiche istologiche e strutturali

Fig. 1.1 *Struttura del legno*

- 1- Midollo
- 2- Anelli di crescita
- 3- Legno
- 4- Cambio
- 5- Floema
- 6- Corteccia esterna



Il legno è la materia prima fornita dagli alberi, organismi viventi formati da *cellule* di diverso tipo a seconda delle funzioni a cui sono chiamate: le associazioni di cellule simili o, per meglio dire, aventi lo stesso compito, vengono indicate con la denominazione di *tessuti*.

I tessuti che costituiscono il legno dei fusti arborei sono:

- Il *tessuto meccanico fondamentale* o *di sostegno* che consta di cellule fusiformi allungate disposte parallelamente all'asse longitudinale dell'albero. Questo tessuto è la parte predominante arrivando ad occupare dal 60 all'80% del volume del fusto: esso svolge la fondamentale funzione di assicurare la resistenza dell'albero alle sollecitazioni esterne, le quali possono ricondursi ad una compressione assiale (per lo

più un carico di punta) diretta dall'alto verso il basso ed a sollecitazioni di flessione (del tipo a mensola incastrata) per effetto del vento, a volte aggravata da sforzi di torsione.

- Il **tessuto conduttore** destinato alla conduzione dei succhi: esso è formato da cellule (dette *vasi* o *trachee*) a forma tubolare, orientate in direzione verticale, cioè parallelamente alle cellule del tessuto meccanico, e con diametro variabile entro limiti talvolta molto ampi, ma comunque sempre superiore a quello delle fibre di detto tessuto.
- Il **tessuto parenchimatico** o di **riserva** che deve porre a disposizione le sostanze necessarie per i fenomeni biologici connessi con la vita e lo sviluppo dell'albero: le cellule di tale tessuto sono per la massima parte organizzate in specie di nastri, denominati raggi midollari, decorrenti in senso orizzontale dal midollo verso la periferia. La forma delle cellule componenti i raggi è per lo più grossolanamente prismatica con asse maggiore orizzontale: esse però non sono le uniche cellule parenchimatiche presenti giacché altre possono trovarsi sparse tra le fibre del tessuto meccanico seguendone l'andamento verticale: in tal caso la loro forma è affusolata.

Oltre a questi tre tessuti fondamentali possono essere presenti anche altre tipi, il più importante dei quali è il **tessuto secretore** di resina o di gomma, formato da cellule tubiformi allineate in condotti sia verticali che orizzontali in senso radiale.

Tanto nelle conifere che nelle latifoglie i fusti si formano e si accrescono grazie all'attività di uno strato generatore di cellule, detto **cambio** (punto 4 della figura 1.1) che è interposto tra legno e corteccia. Tale attività generatrice nei paesi delle zone temperate (e quindi in tutta Europa, nell'America del Nord e nell'Asia Settentrionale, nonché nelle zone meridionali dell'Africa, dell'America del Sud, e di parte dell'Oceania), non è continua durante tutto l'arco dell'anno ma dopo aver raggiunto un massimo durante la ripresa primaverile della vegetazione decresce progressivamente nell'estate terminando nell'autunno ed interrompendosi del tutto nell'inverno.

Questa periodicità nella formazione del legno si traduce in una diversità dimensionale delle cellule (*fibre*) del tessuto meccanico fondamentale: quelle formate in primavera sono più grandi, con ampie cavità interne e pareti sottili, mentre col passare all'estate ed all'autunno le dimensioni trasversali decrescono, il lume si fa più esiguo e le pareti aumentano di spessore. Nelle Conifere le fibre (che assumono allora la denominazione fibrotracheidi) oltre la funzione di resistenza meccanica disimpegnano altresì la conduzione della linfa sostituendo i vasi che sono pertanto assenti.

Nelle latifoglie invece i vasi sono sempre presenti ed il ritmo stagionale condiziona l'area complessiva delle loro cavità che in primavera devono essere più grandi, il che viene ottenuto da un loro maggior numero oppure da un diametro più elevato di quello dell'estate autunno. Il primo caso si verifica per legni di Faggio e di Pioppo mentre il secondo, che assai più evidente all'occhio dell'osservatore, è tipico delle Querce, del Castagno e delle Robinia.

Le diversità strutturali derivanti dai cicli stagionali propri dei cicli temperati appaiono nelle sezioni trasversali dei fusti (fatte cioè con un piano orizzontale perpendicolare all'asse arboreo) come una successione di *anelli concentrici di accrescimento* chiaramente identificabili nei legni di tutte le Conifere e di gran parte delle Latifoglie. Ogni anello è costituito da due strati più o meno definiti. La parte più vicina al centro, di colore più chiaro e trama più diradata, si forma durante la stagione primaverile, quando la crescita è più rapida. È per questo chiamato *legno precoce*, *legno primaverile* o *legno primaticcio*. La parte esterna è chiamata *legno tardivo*, *legno autunnale* o *legno estivo*, poiché la sua produzione avviene alla fine della stagione vegetativa tra l'estate e l'autunno.

L'esame di detti anelli è di grande importanza perché, se fatto alla base del fusto, consente di conoscere l'età della pianta e per di più indica come è cresciuto l'albero: anelli stretti sono ascrivibili a suolo poco fertile e a stagioni di breve soleggiamento, temperature piuttosto basse e scarse precipitazioni; mentre anelli larghi denotano condizioni favorevoli: buona fertilità del suolo, stagione vegetativa prolungata, con temperature elevate, ed abbondanti precipitazioni.

La evidente correlazione tra il clima e l'ampiezza degli anelli consente di giudicare con l'esame delle sezioni basali degli alberi di avanzata età quali sono state le vicende climatiche del passato: la disciplina che studia tale argomento è la *Dendrocronologia*.

Negli alberi delle zone tropicali in cui la vegetazione non subisce le interruzioni invernali proprie delle zone temperate, ma può invece rallentare od arrestarsi per cause non regolarmente periodiche (per es. prolungate ed eccezionali siccità) l'apparizione degli anelli è una circostanza puramente accidentale dalla quale non si può assolutamente arguire l'età dell'albero.

Per i legnami da costruzione correntemente impiegati nel nostro Paese, che di larga massima sono costituiti da Conifere, l'ampiezza degli anelli di accrescimento è un elemento di notevole importanza agli effetti della qualificazione e del giudizio di qualità, infatti anelli larghi indicano accrescimento rapido, il che, almeno per quanto riguarda le conifere della zona montana, va a discapito del volume realmente occupato dalle pareti cellulari, e pertanto dalla massa nonché, ovviamente delle resistenze meccaniche che dipendono dallo spessore di dette pareti. Ad esempio, se un legno di pino duro viene confrontato con un esemplare più leggero, si può notare come nel legno duro sia presente una maggiore quantità di legno tardivo, ed è di aspetto più scuro. In tutte le specie il legno tardivo è più denso di quello precoce, per cui maggiore è la sua quantità, maggiore è la densità e la resistenza del legno.

Dovendo scegliere un legno di pino per avere resistenza o rigidità, l'elemento da considerare è il rapporto tra legno tardivo e legno precoce. Lo spessore degli anelli non è tanto importante quanto l'abbondanza di legno tardivo. Non solo la proporzione è importante ma anche la quantità totale. In esemplari con una abbondante porzione di legno tardivo è evidente anche una maggiore porosità, e per questo può costituire una massa minore rispetto ad una porzione minore ma più densa.

Non c'è una spiegazione univoca del motivo alla base della formazione dei due tipi di legno, molti fattori entrano in gioco.

Nelle conifere, il tasso di crescita da solo non giustifica la proporzione tra le parti dell'anello; in alcuni casi il legno a crescita lenta è più duro e denso, in altri è vero l'opposto.

La qualità del luogo nel quale l'albero è cresciuto incidono sulle proprietà del legno, anche se non è possibile stabilire una regola generale. Si può grossomodo dire che se occorre resistenza e lavorabilità è preferibile utilizzare legno a moderata o lenta crescita, ma nella scelta di uno specifico esemplare non si deve guardare lo spessore degli anelli, ma la proporzione tra legno precoce e tardivo e le caratteristiche di quest'ultimo.

Nel caso del legno duro con porosità ad anello sembra esistere una relazione tra il tasso di crescita e le proprietà del legname, riassumibile nell'affermazione che maggiore è la velocità di crescita o maggiore è lo spessore degli anelli, maggiore è la densità, la durezza e la rigidità. Questo è però valido solo per il legno con porosità ad anello, come l'ontano e altre specie, ed esistono naturalmente delle eccezioni e limitazioni.

Il legno con ampi anelli è anche detto *di seconda crescita*, poiché a causa dell'abbattimento dei vecchi alberi circostanti, il giovane albero cresce più rapidamente che se fosse rimasto in mezzo alla foresta. Questo tipo di legno è preferito nella costruzione di manufatti dove sia importante la resistenza, per esempio nei manici e nei raggi delle ruote in legno, dove è importante non solo la resistenza ma anche la durezza e la resilienza.

1.2 Durame e Alburno

Quando l'albero è in età giovanile la circolazione della linfa, che con l'elaborazione fatta tramite la funzione di clorofilliana della chioma porterà alla pianta i composti necessari alla sua esistenza ed al suo sviluppo, avviene nell'ambito della intera sezione trasversale nel cui interno anche le cellule parenchimatiche sono pienamente attive. Col passare del tempo la circolazione dei succhi si sposta via via nella corona periferica esterna mentre le cellule della parte centrale perdono la loro attività: in particolare le cellule parenchimatiche muoiono e le sostanze di riserva in esse contenute scompaiono e si trasformano depositandosi all'interno della cavità cellulare. Questo insieme di fenomeni collegati al passare del tempo fa sì che nei fusti che hanno oltrepassato l'età giovanile si abbiano due zone di diverse caratteristiche: una periferica esterna in piena attività, ed una interna che non svolge più alcuna funzione fisiologica. Se tali due zone non presentano visivamente sensibili differenze di colore il legno si dirà indifferenziato, mentre quando la zona interna ha un colore più cupo, nettamente distinto dalla parte periferica chiara, il legno risulta differenziato. Alle due zone di diverso colore vengono attribuite particolari denominazioni, e precisamente *Alburno* alla corona perimetrale chiara e *Durame* al cuore interno.

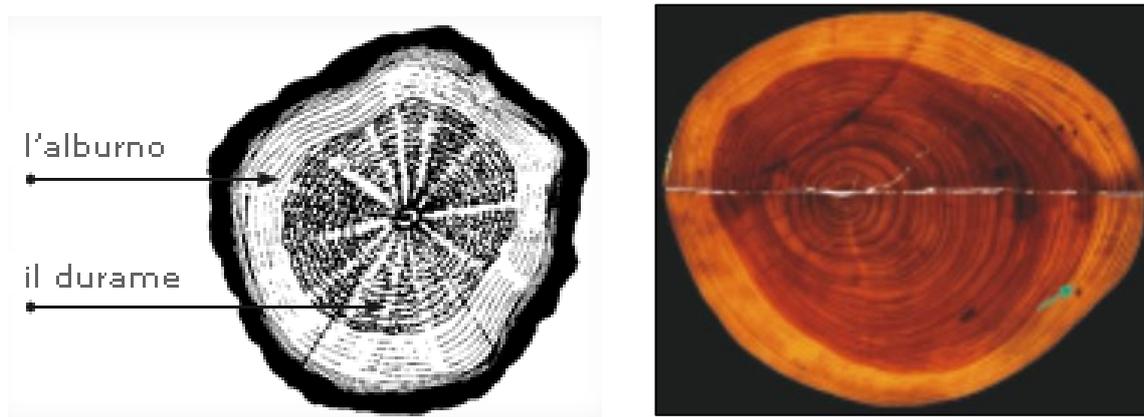


Fig. 1.2 *Durame e alburno*

L'alburno fresco è sempre di colore chiaro (da cui il nome), a volte bianco ma più spesso con una sfumatura di giallo o bruno.

Sulla differenziazione di colore tra durame ed alburno può influire anche la natura del terreno sul quale è fatta crescere la pianta (fenomeno molto evidente per l'albero di noce) poiché i componenti chimici del suolo (ad esempio quelli di derivazione organica animale come i liquami stagnanti) accentuano maggiormente la marcatura del durame sull'alburno.

La funzione principale dell'alburno è di trasportare l'acqua dalle radici alle foglie e di immagazzinare o restituire, a seconda della stagione, la linfa grezza sintetizzata nelle foglie. Maggiore è la quantità di foglie, maggiore è il tasso di crescita della pianta e maggiore è il volume di alburno necessario. Per questo gli alberi che crescono in spazi aperti ed hanno più luce a disposizione, hanno più alburno (relativamente al raggio totale del tronco) rispetto ad un albero della stessa specie che cresca in una densa foresta. Gli alberi isolati possono raggiungere dimensioni notevoli in alcune specie, più di 30 cm in diametro per il pino, prima che inizi la formazione del durame.

In alcune specie la formazione di Durame inizia presto e per questo hanno un sottile strato di Alburno, in altre invece la formazione inizia tardivamente e lo strato di alburno è più spesso.

Non c'è una relazione precisa tra la crescita annuale degli anelli e la quantità di alburno. Nell'ambito di una specie la superficie della sezione dell'alburno è solo molto approssimativamente in proporzione con la dimensione del tronco. Se gli anelli sono fitti, ne è richiesto un numero maggiore che se fossero più allargati. Quando un albero cresce l'alburno aumenta in spessore oppure volume. Lo spessore relativo è maggiore nelle parti più alte del tronco, per il fatto che il diametro totale è minore rispetto alla base e perché le parti alte sono più giovani.

Importante ricordare che per gli impieghi industriali del legno ed in particolare nel settore mobili/arredamento è preferibile utilizzare (per quanto possibile) il durame (massello). Infatti il durame rispetto all'alburno dello stesso tipo di legno ha caratteristiche tecnologiche qualitativamente migliori: maggiore durezza, maggiore stabilità, maggiore

resistenza all'azione di organismi vegetali e animali (muffe, funghi, insetti xilofagi), maggiore livello di finitura delle superfici.

1.3 Nodi



Fig. 1.3 *Nodo in un legno di Abete rosso*

I *nodi* sono un prolungamento di un ramo, all'interno del fusto o di un ramo più grande. I rami si sviluppano partendo dal midollo, la parte centrale del fusto, ed aumentano la loro dimensione aggiungendo ogni anno un anello di legno, che è la continuazione del corrispondente anello del fusto. La porzione inclusa ha una forma conica-irregolare, con la punta in corrispondenza del midollo e le fibre poste ad angolo retto oppure oblique rispetto a quelle del fusto e con queste intrecciate.

Durante lo sviluppo dell'albero, la maggior parte degli strati (specialmente quelli più interni) muoiono, ma rimangono integri per anni. Gli strati successivi non sono intimamente legati con gli strati morti, ma vi crescono sopra, avvolgendoli; ne consegue che quando un ramo si secca lascia nodi che sono come un tappo in un buco, e facilmente si staccano quando il legno viene segato. Si riconoscono tre tipologie di nodi:

- nodi sani, perfettamente aderenti;
- nodi cadenti;
- nodi morti, nel caso la parte di ramo rimasta nel fusto abbia subito un attacco da parte di funghi.

Nella classificazione del legname i nodi sono stimati in base alla forma, la dimensione, il colore, l'integrità e la fermezza con cui rimangono in sede.

La presenza dei nodi influisce sulla resistenza alla bluttura, sulla deformabilità, sulla facilità di lavorazione e la tendenza alla formazione di fessure. Sono difetti che in genere riducono la qualità del legname e ne abbassano il valore ove sia impiegato come materiale strutturale e sia importante la resistenza. L'indebolimento del legno è ancora più indesiderato dove siano presenti importanti sforzi meccanici di trazione o compressione.

L'influenza dei nodi sulla resistenza di una struttura come una trave dipende dalla loro posizione, dimensione, numero, direzione delle fibre e consistenza. Un nodo presente nella parte superiore viene compresso mentre nella parte inferiore è soggetto a tensione.

La presenza di piccoli nodi lungo la linea di tensione nulla della trave può anche incrementare la resistenza, prevenendo la fessurazione longitudinale. I nodi posti al centro, ad un quarto dell'altezza della trave non sono un problema serio, così come quelli presenti alle estremità. I nodi integri non invalidano il legno quando sottoposti a sforzi compressivi paralleli al senso delle fibre.

Sulle tavole e pannelli i nodi non sono dannosi se decorrono nel senso della lunghezza con un certo angolo rispetto alla superficie maggiore.

I nodi non influiscono sulla rigidità del legname strutturale. Solamente i difetti più importanti possono incidere sul limite di elasticità di una trave. Rigidità ed elasticità dipendono maggiormente dalla qualità delle fibre del legno piuttosto che dai difetti. L'effetto dei nodi è quello di ridurre la differenza tra la tensione delle fibre al limite elastico e il modulo di Young di rottura della trave. La forza di rottura è invece molto influenzata dai difetti. A definire la pericolosità di un nodo contribuisce fortemente il rapporto tra la dimensione del nodo, indicata come diametro, e la dimensione della faccia su cui insiste, oltre che la sezione anatomica in esso presente.

Per particolari applicazioni, per esempio pannelli a vista, la presenza dei nodi è positiva poiché dona al legno un aspetto estetico più variegato ed interessante.

Per i tronchi, per esempio quelli di noce da legno, la presenza di nodi può rappresentare un non trascurabile motivo di deprezzamento qualora si debba procedere alla laminazione per utilizzarne i fogli per impiallacciatura, in quanto la porzione corrispondente all'inserimento del nodo tende, nella lavorazione, a staccarsi.

1.4 Colore

Il colore del legno immune da attacchi fungini dipende essenzialmente dalle caratteristiche intrinseche della specie legnosa e dall'umidità posseduta dal campione al momento dell'osservazione.

Le caratteristiche intrinseche sono da un lato il colore delle pareti cellulari variante tra il giallognolo ed il biancastro (o al brucicco nella zona tardiva degli anelli delle Conifere), e dall'altro la tinta degli estrattivi di cui si è già parlato e che si presentano soprattutto nel fenomeno della duramificazione.

Tra lo stato fresco, e cioè molto umido, e lo stato stagionato possono intervenire differenze sensibili di tonalità del colore dipendenti sia dalla perdita di umidità che da modificazioni chimiche a carico soprattutto degli estrattivi.

Una anormale perdita di colore del legno denota una condizione di possibile malessere della pianta, come attacchi di insetti, o altri animali. Il semplice scolorimento può essere prodotto da una ferita, che non ha influenza comunque sulle caratteristiche del legno. Certi agenti induttori della putrefazione come i funghi impartiscono un colore che è

spesso sintomatico della malattia. La macchiatura della linfa è dovuta alla crescita di funghi, ma che non necessariamente portano ad uno stato di malattia.

Comunque il colore del legno riveste importanza unicamente agli effetti estetici e decorativi.

1.5 Odore e sapore

Le cellule legnose non hanno, di per sé, né un odore né un sapore mentre invece la presenza di particolari estrattivi (resine, oli eterei, zuccheri, tannini, ecc.) può dar luogo a percezioni olfattive e gustative singolari, assai utili per l'identificazione della specie legnosa. Notisi però che quando il materiale è allo stato stagionato l'odore dato dagli oli eterei si attenua fino a scomparire del tutto.

1.6 Rapporti massa/volume

Il legno è costituito da un insieme di cellule cave le quali possono differire sensibilmente tra di loro tanto nei riguardi delle dimensioni quanto dei contenuti di umidità e di sostanze accidentalmente presenti, ciò comporta una ampia variabilità della sua *massa*. Questa caratteristica è un elemento agevolmente determinabile che viene spesso assunto come una indicazione, sia pure approssimativa, delle caratteristiche di resistenza meccanica.

Nel passato veniva usata la dizione "*peso specifico*" per indicare la massa dell'unità di volume di un dato materiale, massa che veniva espressa in g se il volume era espresso in cm^3 , oppure in kg se il volume era espresso in dm^3 quanto se era in m^3 . Riconoscendo il termine specifico è alquanto vago si usa oggi indicare il rapporto tra la massa ed il suo volume come "*massa volumica*" o "*densità*" facendo seguire la precisazione delle unità di misura (g/cm^3 , kg/dm^3 , kg/m^3). Al termine di "*densità relativa*" è da attribuirsi il significato preciso di rapporto tra la massa volumica del corpo in esame e la massa volumica del corpo di riferimento, generalmente assunto nell'acqua di 4°C : si tratta quindi di un rapporto adimensionato.

In relazione al diverso contenuto d'acqua che un campione può presentare sua la massa che il volume dello stesso non sono immutabili nel tempo e ciò esige che i valori siano stabiliti per entrambe le grandezze siano accompagnati dalla precisazione del contenuto di umidità al momento della determinazione. È ovvio poi che per poter porre a confronto le masse volumiche di legni diversi bisognerà che le misurazioni avvengano quando si può essere sicuri che le loro condizioni di umidità siano perfettamente identiche.

Il volume di un pezzo di legno determinato per mezzo delle sue dimensioni esterne non è realmente tutto occupato dalla sostanza legno perché nel suo interno esistono le cavità cellulari: non si può pertanto parlare di un volume della sostanza legnosa in quanto tale, ma bensì di un volume apparente di quel legno, che è sempre più o meno poroso. La massa volumica della sostanza legnosa che costituisce le pareti cellulari, cioè escludendo del

tutto i vuoti interni, è naturalmente maggiore di quella calcolata in base al volume definito dianzi come “apparente” ed è pressoché la stessa per tutte le specie legnose aggirandosi attorno al valore $1,53 \text{ g/cm}^3$ quando il legno è allo stato anidro, e attorno a $1,37 \text{ g/cm}^3$ quando le pareti cellulari sono allo stato di saturazione con l’acqua adsorbita, senza alcun riferimento alla cavità cellulare.

Le masse volumiche dei vari legni presentano normalmente tre serie di valori riferentesi a tre diverse condizioni di umidità e precisamente:

- Stato fresco: umidità superiore al punto di saturazione delle pareti cellulari
- Umidità normale: dal 12 al 15%
- Stato anidro.

È da tener presente che la massa volumica per una determinata specie non è precisabile in un valore unico e costante, ma varia entro ampi limiti in dipendenza di svariati parametri, tra cui:

- Umidità al momento delle determinazioni: nel legno degli alberi appena tagliati il contenuto d’acqua varia a seconda della stagione (con ritmi soggetti a continue modificazioni) e della posizione del campione del fusto. Successivamente con il procedere dell’essiccazione da stagionatura si verifica sempre un gradiente di umidità tra la parte prossima alle testate o nella corona periferica dei tronchi e la zona interna la cui umidità impiega un tempo talvolta notevole a migrare verso l’esterno per disperdersi infine nell’aria circostante;
- I fattori ambientali: clima, altitudine, esposizione, fertilità e profondità del suolo, profondità e dinamica della falda idrica... cioè tutti quelli elementi che condizionano la rapidità e la regolarità dell’accrescimento.

Queste numerose possibilità di variazione fanno sì che non si possa indicare un valore fisso per la massa volumica apparente del legno di una data specie legnosa, cosicché per ognuna delle tre condizioni di umidità sopraindicate vengono forniti tre valori, di cui gli estremi rispondono al minimo ed al massimo riscontrati e quello intermedio al valore di massima frequenza.

La determinazione sperimentale della massa volumica di alcune migliaia di provini di legnami nazionali di più frequente impiego ha permesso di tracciare degli istogrammi e delle curve di frequenza cumulata le quali mostrano chiaramente la diversa ampiezza dei campi di variazione e gli ambiti di maggiore frequenza delle masse volumiche ad umidità normale del 12%.

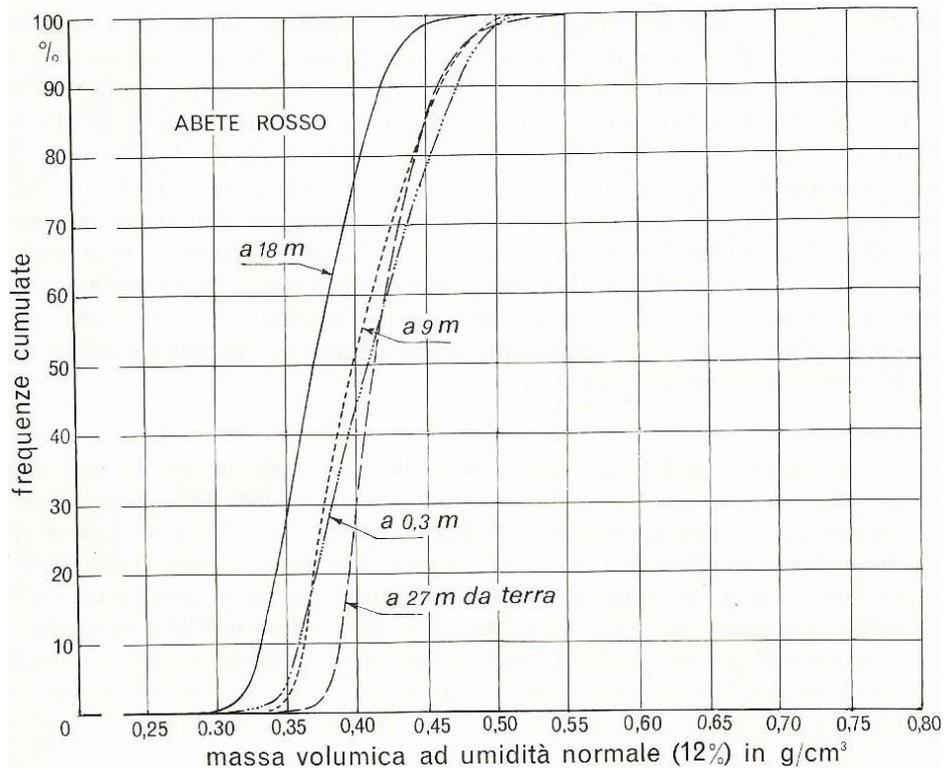


Fig. 1.4 Distribuzione delle masse volumiche ad umidità normale riscontrate a diverse altezze da terra in 10 fusti di Abete rosso del Trentino

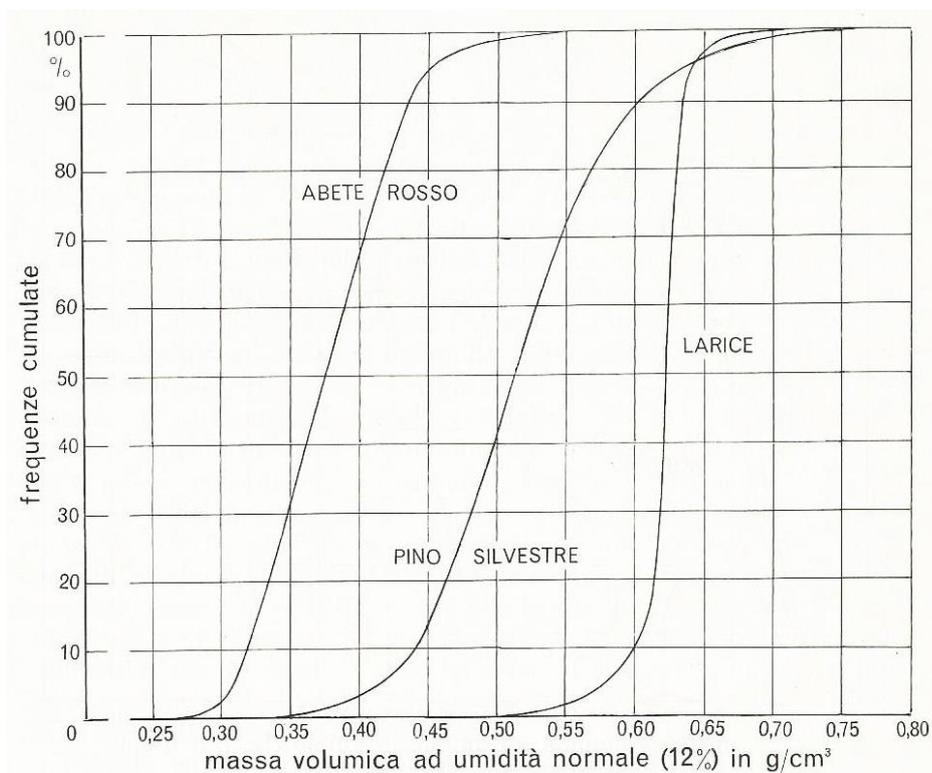


Fig. 1.5 Raffronto tra i campi di variazione della massa volumica ad umidità normale e relative curve delle frequenze cumulate per tre legnami di Conifere della zona alpina largamente usati per scopi strutturali. Si noti la relativa limitatezza del campo di variazione del legno di Larice in confronto all'Abete rosso e soprattutto al Pino silvestre.

Le indicazioni dianzi esposte nei riguardi delle masse volumiche si riferiscono alle modalità comunemente seguite dai tecnici europei per la determinazione di tale importante caratteristica, e cioè effettuando la misurazione in un unico tempo in modo da avere identiche condizioni di umidità tanto per la massa quanto per il volume: stato fresco, stato di umidità normale, stato anidro.

1.7 Relazioni tre legno ed acqua

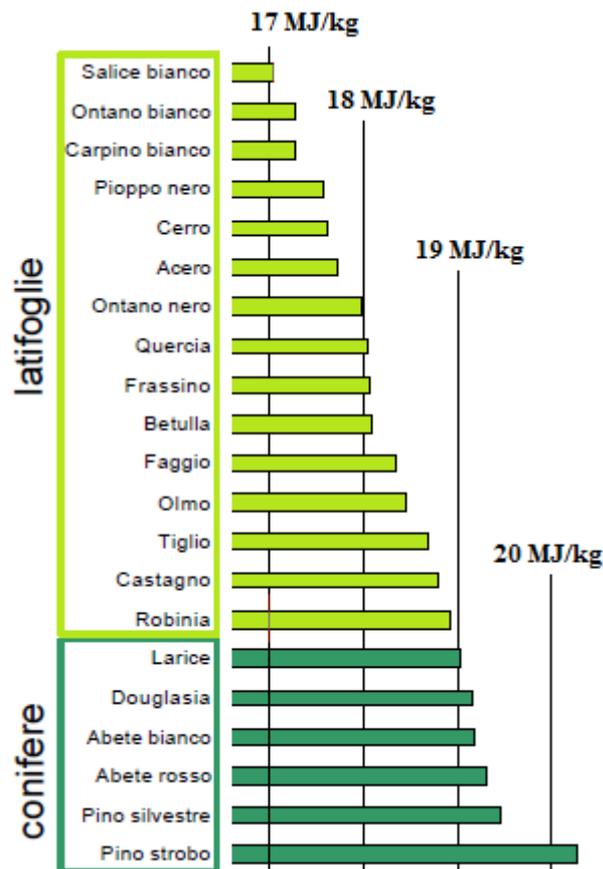


Fig. 1.6 Il potere calorifico superiore del legno dipende al massimo per il 15% dalla specie della pianta: il cambiamento è notevolmente influenzato dalla quantità d'acqua

Nel legno degli alberi viventi ed in quello lasciato all'aria libera subito dopo l'abbattimento è sempre presente dell'acqua.

Questa è presente nel legno vivo in due forme principali:

1. nella parete cellulare (acqua di legame o di saturazione);
2. libera nelle cavità dei tessuti (acqua di imbibizione).

L'insieme di questi modi di presenza dell'acqua nel legno costituisce la sua umidità che viene indicata in forma percentuale dal rapporto tra l'acqua contenuta ed il peso anidro del legno. Per ben comprendere il comportamento del legno sia nelle costruzioni che nei lavori di falegnameria è necessario conoscere quale correlazione esiste tra l'umidità del

legno nell'albero vivente e dopo che lo stesso è stato abbattuto e ridotto in assortimento. Il legno fresco di taglio può contenere una umidità anche superiore al 100% del proprio peso secco. Il 30% è definito come il *punto di saturazione delle fibre (PSF)*, è un valore formale che tiene conto del fatto che questo valore è in realtà compreso tra il 25 e il 40% a seconda della specie e, principalmente ma non solo, della densità. Il PSF corrisponde all'umidità percentuale del legno per la quale tutti i condotti cellulari (lumi) sono vuoti ma le pareti cellulari sono sature d'acqua. Ciò significa che non ne possono contenere altra al suo interno e quindi l'acqua in più si riversa nei condotti cellulari. Al di sopra del PSF oltre l'acqua di legame vi è anche acqua libera; al di sotto vi è solo acqua di legame. Il legno è un materiale igroscopico, l'acqua può legarsi ad esso sotto forma di vapore che interagisce con la parete cellulare o in forma liquida che scorre nei lumen cellulari. Soltanto la prima influenza significativamente le proprietà del legname. L'eliminazione dal tessuto legnoso dell'acqua libera non crea nessuna modifica nel tessuto se non un evidente calo di peso, l'eliminazione dell'acqua legata alle pareti cellulari (*essiccazione* del legname o *stagionatura*) crea delle deformazioni e ritiri del legno.

Una volta che l'albero è stato abbattuto e ridotto in assortimenti la superficie esterna di questi viene a contatto con l'aria ambiente la quale, per conto suo, avrà anch'essa un certo contenuto di umidità relativa. Tra le due umidità, e cioè tra quella del legno e quella dell'aria si viene a stabilire un equilibrio mediante una evaporazione superficiale che, a sua volta, determina una lenta migrazione dell'assortimento verso la superficie. È precisamente un fenomeno di tale natura che determina la *stagionatura* del legno, termine col quale non si deve affatto pensare che possa pervenirsi ad eliminare completamente l'umidità del legno, ma semplicemente a portarla in equilibrio con l'umidità relativa dell'aria ambiente. Il legno essiccato all'aria contiene ancora il 12%-16% di umidità. Né, del pari, deve pensarsi che il raggiungimento di tale equilibrio porti ad avere nel legno una umidità che non si modifica più nel tempo: il fenomeno del desorbimento naturale è infatti del tutto reversibile e anche il legno equilibratosi da secoli con un dato ambiente una volta portato all'esterno in ambiente ad aria umida adsorbe nuovamente umidità.

Per passare dai concetti astratti a dei dati concreti può dirsi che legno fresco esposto ad aria in condizioni normali, e cioè a temperatura attorno ai 20°C e con umidità relativa del 60-65%, assume una umidità di equilibrio del 12% del peso anidro: per convenzione internazionale detta umidità viene considerata l'umidità normale del legno, ed è ad essa che vengono riferite le determinazioni e le prove di qualificazione. Per legno esposto alle variazioni igrometriche dell'ambiente esterno (per es. legno di strutture da tetto o da infissi) si potrà tener conto di un equilibrio oscillante tra il 15 e il 18% mentre invece per locali chiusi e fortemente riscaldati durante l'inverno (pavimenti di abitazioni) si può scendere anche del 10-8%; infine per legno da costruzioni stradali, idrauliche e navali, esposto quindi alle precipitazioni meteoriche o addirittura immersione totale è chiaro non osservi alcuna necessità di stagionare il materiale legnoso prima della posa in opera.

La determinazione dell'umidità si effettua attraverso il metodo gravimetrico, pesando un campione di biomassa tal quale e introducendolo in una stufa ventilata e termostata a

103°C (±2°C). la quantità di acqua evaporata, e quindi l'umidità sul tal quale si valuta misurando differenza fra il peso iniziale del campione m_I e quello finale m_F :

$$U = \frac{m_I - m_F}{m_I}$$

Qualora si voglia controllare con questo sistema l'umidità media di una partita di legname da costruzione bisognerà ricorrere ad un congruo numero di provini prelevati secondo le norme regolanti la campionatura dei materiali. Vi è tuttavia da tenere presente che se per piccoli campioni si può considerare che l'umidità determinata come è detto sopra è realmente l'umidità di tutto il campione, per pezzi molto grandi, come travi o tavole, nei quali vi è un sensibile (o addirittura elevato) gradiente di umidità tra la superficie esterna (particolarmente nelle sezioni trasversali = testate) e l'interno dei pezzi, la posizione di prelevamento dei campioni può avere una notevolissima influenza e dare delle indicazioni ben lontane dalla reale umidità media.

La prassi seguita correntemente per determinare l'umidità del legname da costruzione è tuttavia quella che ricorre all'impegno degli igrometri, strumenti di facile reperimento sul mercato e dei quali esistono svariati tipi basati sulle variazioni della resistenza elettrica o delle proprietà dielettriche per effetto dell'umidità. Nell'impiego di queste apparecchiature bisogna tener conto di due circostanze: la eventuale presenza di un gradiente tra le varie posizioni in cui possono fissarsi gli elettrodi e il campo di misurazione.

Per accelerare i lunghi tempi richiesti dalla stagionatura all'aria esterna la quale, comunque, non consente mai al legno di raggiungere umidità sotto l'11-12%, si ricorre all'essiccazione artificiale, la quale può essere condotta con vari sistemi (ad aria calda, a depressione, a condensazione...) i quali portano ad ottimi risultati in tempi assai più brevi. Infatti, l'umidità del legno asciugato in essiccatoio può essere portata a valori più bassi (anche fino al 6-8%).

È credenza ancora largamente diffusa che la stagionatura all'aria aperta porti ad avere materiale in condizioni migliori e più stabile del materiale essiccato con procedimenti artificiali. Ciò non risponde assolutamente alla realtà delle cose, purché i vari sistemi ai quali si può ricorrere rispondano a dei concetti razionali ed i regimi indicati dagli Istituti di Ricerca per le varie specie legnose vengano seguiti con particolare cura da personale responsabile ed appositamente formato.

Anche la conservazione nei depositi di segheria e nei cantieri deve venire attentamente considerata perché durante il suo decorso possono facilmente installarsi alterazioni e gravi deterioramenti provocati da attacchi di funghi e di insetti: non basta che il materiale fosse in perfette condizioni nell'atto dell'accatastamento, ma tale deve essere anche al momento della posa in opera.

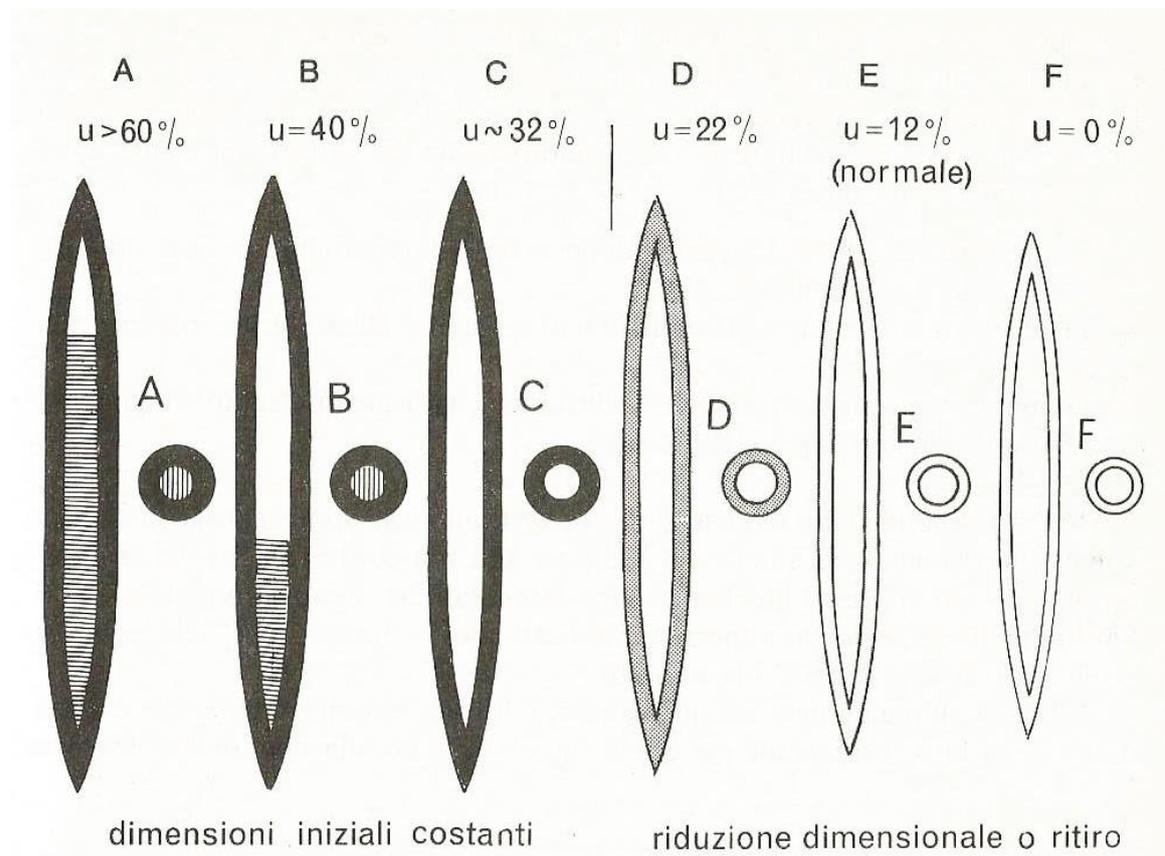


Fig. 1.7 *Rappresentazione schematica del comportamento di una singola fibra legnosa partendo dallo stato fresco e passando per le diverse fasi della stagionatura naturale all'aria e terminando poi con lo stato anidro ottenuto in stufa riscaldata a 103°C*

- A. Allo stato fresco, e cioè nell'albero vivente la cavità cellulare è totalmente o parzialmente riempita d'acqua libera (= Linfa) mentre le pareti cellulari sono sature d'acqua;
- B. Dopo l'abbattimento dell'albero il fusto comincia a perdere una certa parte dell'acqua libera, ma le pareti cellulari permangono ancora completamente sature e non subiscono alcuna variazione dimensionale;
- C. Continuando la perdita di umidità per effetto dell'azione essiccante dell'aria si perviene al punto di saturazione delle pareti cellulari in corrispondenza del quale non vi è più acqua libera nell'interno delle cavità cellulari, ma vi è ancora tutta l'acqua collegata alle pareti: è appena da questo momento che hanno inizio le diminuzioni dimensionali che vengono indicate con nome di "ritiri";
- D. Proseguendo l'esposizione all'aria viene progressivamente ad eliminarsi una parte dell'acqua collegata alle pareti mentre si manifestano i ritiri;
- E. L'azione disidratante dell'aria viene a cessare quando tra legno e aria ambiente si è stabilito l'equilibrio igroscopico: tale condizione, per aria a 20°C e umidità relativa del 60-65%, comporta nel legno una umidità normale del 12%;
- F. La semplice esposizione all'aria non è sufficiente a far pervenire il legno allo stato anidro: per raggiungere tale condizione (Che ovviamente determina il massimo ritiro possibile) è necessario ricorrere a procedimenti artificiali di essiccazione notando però che legno anidro, se esposto all'aria, riadsorbe rapidamente umidità sino allo stabilirsi di un nuovo equilibrio igrometrico.

1.8 Perché essiccare

Dopo aver indicato come avviene l'essiccazione del legno ci si può porre la domanda di quali sono i motivi che rendono necessaria tale operazione. Per quanto riguarda l'impiego del legno nelle costruzioni edili gli aspetti da prendere in considerazione sono essenzialmente tre, di motivazioni del tutto diverse, ma di comune importanza:

- Evitare forti variazioni dimensionali per effetto di possibili modificazioni dello stato igrometrico dell'aria;
- Porre il legno nelle migliori condizioni di resistenza alle sollecitazioni meccaniche;
- Aumentare per quanto possibile la durabilità naturale del legno nei confronti degli attacchi di funghi e insetti.

La forma allungata delle cellule legnose, il loro orientamento spaziale e le modalità della loro formazione per anelli successivi sono alla base dell'anisotropia del legno la quale si manifesta in vari modi: tra questi quello appariscente per chiunque è la diversità dei "movimenti" nelle tre direzioni anatomiche.

Allo stato fresco, cioè nel legno degli alberi viventi, le cellule hanno la cavità interna più o meno riempita di linfa, sono turgide e tra di esse non sussiste alcuna discontinuità infracellulare, inoltre le pareti sono sature d'acqua che, in forma assai complessa, è presente tra le minutissime particelle costitutive degli strati di parete. Dopo l'abbattimento dell'albero l'acqua liberata nell'interno delle cavità cellulari diminuisce progressivamente col passare del tempo e, ad un certo momento, sarà del tutto scomparsa mentre sarà presente tutta l'umidità collegata alle pareti cellulari. Questo punto di passaggio obbligato è detto **punto di saturazione** (totale) **delle pareti cellulari** e, tradotto in cifre, corrisponde ad una umidità percentuale compresa tra il 30 ed il 35% del peso anidro del legno. Questo punto di passaggio è assai importante perché sino a che l'umidità reale non è scesa ad un livello inferiore le dimensioni del campione di legno permangono assolutamente immutate in tutte le direzioni, mentre invece proseguendo la stagionatura che porta all'eliminazione di una parte più o meno grande dell'umidità collegata alle pareti cellulari si riscontrano delle diminuzioni dimensionali indicate col termine di ritiri. Dette variazioni sono molto diverse nelle tre direzioni anatomiche ed i loro valori per i legnami di più frequente impiego nelle costruzioni possono essere indicati, per il passaggio dallo stato fresco allo stato anidro, come segue:

- Nella direzione assiale (cioè lungo le fibre) inferiore all'1%;
- Nella direzione radiale dal 3 al 6%;
- Nella direzione tangenziale dal 5 al 12%.

Il legno in equilibrio igrometrico con l'aria ambiente non è mai allo stato anidro e di conseguenza le diminuzioni dimensionali tra lo stato fresco e quello di equilibrio con

l'aria ambiente sono sempre minori delle cifre predette, seguendo una relazione lineare correlata alla discesa dell'umidità; correntemente si considera che la variazione nel senso delle fibre si aggiri sullo 0,25% mentre nelle direzioni trasversali sia mediamente dal 3 al 5%. Sono queste le percentuali di soprammisura (rispetto alle dimensioni a cui devono essere vendute le tavole stagionate) che normalmente si adottano nella segazione di tronche tagliati da poco.

I fenomeni di ritiro sono reversibili, vale a dire che le dimensioni raggiunte dal legno che ha subito una essiccazione non sono immutabili, ma per esposizione in aria umida il "movimento" si inverte ed il legno si rigonfia. Per quanto le variazioni dimensionali connesse con pari intervalli di desorbimento non siano perfettamente coincidenti a causa di una certa isteresi, all'atto pratico essi possono venire considerati di uguale entità.

1.8.1 Conseguenze dei "movimenti" dovuti alle variazioni dell'umidità nelle tavole

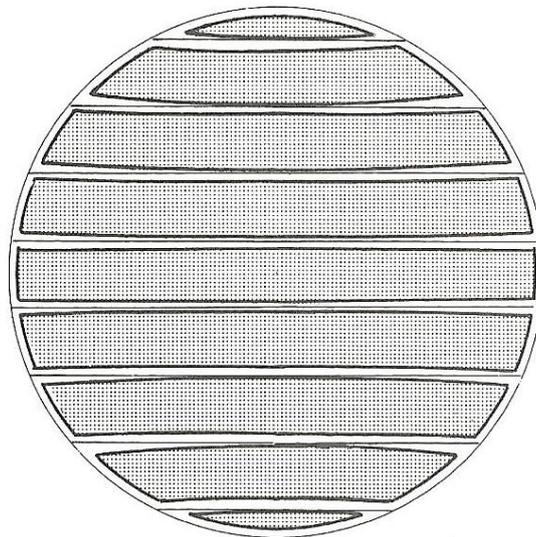


Fig. 1.8 Ritiri e deformazioni delle tavole segate "in parallelo" da un tronco fresco di taglio: alle estremità superiore ed inferiore appaiono gli sciaveri che fanno parte delle perdite di lavorazione

La diminuzione dell'umidità propria del legno fresco oltre ai ritiri determina altresì, per il combinarsi delle forze che provocano i detti "movimenti", delle deformazioni le quali variano di aspetto e di entità a seconda del come i pezzi sono orientati rispetto agli anelli di accrescimento. Mentre le tavole tagliate esattamente lungo una direzione radiale durante il ritiro da stagionatura subiscono unicamente delle riduzioni dimensionali rimanendo però piane, le tavole tagliate tangenzialmente si curvano con la concavità verso l'esterno dando luogo al cosiddetto "imbarco" che sarà tanto più pronunciato ed evidente quanto più la tavola è stata tagliata lontano dal midollo.

2. GLI ISOLANTI NATURALI

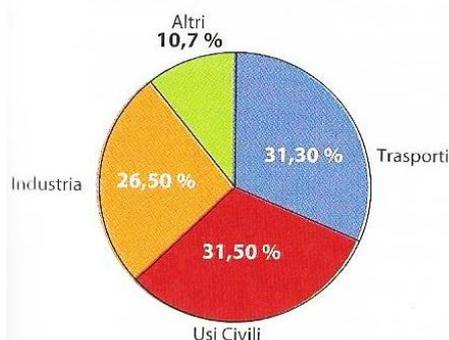
Per "Isolanti naturali" si intendono i materiali di **origine naturale**, che non presentano cioè componenti di origine sintetica e petrolchimica.

Gli isolanti naturali sono prodotti partendo da **materie prime rinnovabili**, con processi di produzione e installazione non dannosi per l'ambiente e per l'uomo, sono riciclabili e biodegradabili e richiedono un basso contenuto di energia per il loro ciclo di vita.

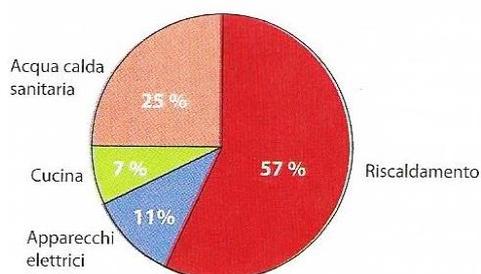
La forte dipendenza del mondo occidentale dal petrolio non riguarda solo i trasporti e i settori produttivi industriali, ma anche e soprattutto il settore dell'edilizia. La preoccupazione per l'esaurimento delle risorse naturali non rinnovabili e il crescente inquinamento atmosferico, terrestre e marino, porta alla necessità di individuare energie e prodotti alternativi a quelli derivati dalla chimica pesante.

Il mondo dell'industria delle costruzioni è uno dei maggiori responsabili della crisi ambientale: da solo consuma circa il 40% delle risorse naturali. È uno dei più importanti consumatori di combustibili fossili, sia in fase di costruzione (estrazione, produzione e trasporto dei materiali) sia in quella di gestione (manutenzione, climatizzazione, illuminazione) : gran parte dell'energia viene impiegata nel riscaldamento (e da qualche anno anche per il raffrescamento) degli edifici, che, in gran parte, sono scarsamente o per nulla coibentati.

Consumo di energia primaria in Italia



Consumo di energia nell'ambiente abitativo (dati medi europei)



Più o meno fino alla seconda guerra mondiale la totalità dei materiali da costruzione era per un 60-70% di derivazione minerale (pietra, calce, laterizio, cemento) e per 30-40% di derivazione vegetale o animale. Oggi invece la quasi totalità dei materiali in commercio presenta una maggiore o minore quantità di sostanze di origine petrolchimica.

Isolare con materiali "naturali" per climatizzare l'edificio, e quindi risparmiare energia, dovrebbe diventare la prassi quotidiana.

In Italia solo dalla metà degli anni 70, ovvero dopo la prima crisi petrolifera (1973), ha cominciato a diffondersi l'uso dei materiali isolanti. Prima gli unici isolanti utilizzati, e in casi molto rari, erano materiali di fortuna spesso derivati da scarti di lavorazione agricole. Quando si parla di isolanti si parla quindi di materiali edili che l'uomo utilizza non da epoche remote come calce, il legno, il laterizio, materiali sperimentati a lungo e di cui sono state studiate e accertate le qualità biologiche e di salubrità, ma di materiali che sono in parte ancora da scoprire e da studiare.

La distribuzione in Italia di materiali isolanti meno impattanti a livello ambientale presenta ancora molti aspetti critici, e la loro commercializzazione non è paragonabile a quella dei materiali sintetici o delle lane minerali.

Certo se si fa un'analisi economica dei diversi materiali isolanti questa premierà quelli correntemente utilizzati, ma ciò non può essere sufficiente a limitare la conoscenza e la commercializzazione di materiali alternativi, già noti o da scoprire, a minore impatto ambientale, con caratteristiche di compatibilità biologica superiore e con livelli prestazionali pari, se non superiori, a quelli noti e comunemente utilizzati.

Il costo al momento superiore degli isolanti naturali potrebbe abbassarsi grazie a un incremento delle vendite. Anche perché bisogna domandarsi se il prezzo degli isolanti di derivazione petrolchimica è il prezzo vero che paghiamo o se include una "tassa ambientale" che viene comunque fatta pagare a tutti.

L'Italia è uno dei paesi europei con il più basso utilizzo di materiali coibenti in edilizia; per cui oltre a capire quali materiali potrebbero essere messi in opera in alternativa a quelli petrolchimici, sarebbe per prima cosa necessaria la formazione di una coscienza che prenda atto dell'utilità (anzi, della necessità) in termini ambientali di isolare termicamente un edificio.

Gli spessori degli isolamento termico usati oggi in edilizia sono troppo bassi per incidere realmente sul contenimento dei consumi per il riscaldamento. Manca in Italia la cultura dell'isolamento termico che potrebbe limitare il fabbisogno di energia: quello per il riscaldamento invernale, più sentito nelle zone settentrionali e centrali, e quello per il condizionamento estivo, cui sono più interessati i progettisti del Sud.

Il vero risparmio energetico deve derivare dalla riduzione del fabbisogno di energia e non dall'uso di impianti più raffinati ed efficienti, che comunque presuppongono l'utilizzo di energia. Solo in pochi casi l'utilizzo l'efficienza degli impianti diventa decisiva nella riduzione del fabbisogno energetico di un edificio.

Negli edifici a destinazione residenziale, costruiti o in costruzione, è indispensabile garantire un ottimo isolamento dell'involucro, opaco e trasparente, per limitare le dispersioni e garantire condizioni ottimali di comfort.

Sarebbe quindi necessario prendere la sana abitudine di considerare l'isolamento termico come un investimento economico (e prima ancora ecologico) e cominciare a usare il calcolo del bilancio energetico come strumento di progettazione architettonica per verificare e modificare le prestazioni degli edifici in fase progettuale, comprendendo così come la messa in opera di coibente termico rappresenti oggi uno degli investimenti economici più interessanti: maggiore isolamento implica un extracosto ammortizzabile in pochi anni di gestione dell'immobile, e diventa quindi fonte di reddito nei successivi.

Il vero problema sta nel fatto che questa forma di risparmio-guadagno, dovuto all'iniziale investimento in centimetri in più di isolante, è destinato all'utente finale e non al costruttore o al progettista.

Sembra però riduttivo riferirsi sempre e comunque agli aspetti economici, quando sono evidenti (ed eticamente più nobili) soprattutto i benefici a livello ambientale, ovvero la riduzione di emissione di inquinanti da combustione; ma mettere in rilievo l'aspetto

economico si dovrebbe mettere in luce la quantità di anidride carbonica risparmiata in quanto non emessa in atmosfera.

In un paese in cui la miopia nel settore edilizio sembra andare di pari passo con l'interesse a un guadagno immediato, anche la normativa energetica relativa al settore edilizio non è stata mai caratterizzata da grande lungimiranza. I costruttori edili, generalmente molto attenti solo alla realizzazione di immobili che costino il meno possibile, con il risultato di trasferire gli alti costi di gestione sugli acquirenti, hanno influito in modo significativo sull'emanazione di norme non troppo restrittive e vincolanti.

Così è stato fino all'emanazione della legge 10/91, norma cogente che ha regolato finora il risparmio energetico in edilizia ma che di fatto non ha modificato in modo sostanziale i consumi energetici invernali. Per fortuna oggi a livello europeo, e di conseguenza anche in Italia (anche se qui con grande lentezza e ancora poca chiarezza), le norme spingono sempre più verso il risparmio energetico degli edifici. Il decreto legislativo 192 del 19 agosto 2005, in attuazione della direttiva 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico in edilizia, indica valori limite di trasmittanza termica inferiori a quelli finora imposti: dal 2009, a meno di modifiche legislative a venire, questi valori dovrebbero essere ulteriormente ridotti.

È interessante notare che questo decreto porterà a un significativo cambiamento nell'approccio progettuale all'isolamento termico, imponendo trasmittanze che richiedono decisivi incrementi dello spessore degli isolanti utilizzati: in certi casi si avrà addirittura il raddoppio dello spessore, in altri addirittura lo studio di nuove tecniche costruttive e stratigrafie dell'involucro.

2.1 Classificazione dei materiali isolanti

Una classificazione dei materiali isolanti può essere fatta in base alla loro provenienza, che può essere di origine vegetale, animale, minerale o sintetica e in base alla struttura interna del materiale che può essere fibrosa o cellulare.

Origine vegetale:

Struttura fibrosa:

- Fibra di legno
- Fibra di legno mineralizzata
- Fibra di cellulosa
- Fibra di kenaf
- Fibra di canapa
- Fibra di lino
- Fibra di mais
- Fibra di cocco
- Fibra di juta
- Canna Palustre

Struttura cellulare:

Sughero

Origine animale:

Struttura fibrosa:

Lana di Pecora

Origine minerale:

Struttura fibrosa:

Fibra di vetro

Fibra di roccia

Struttura cellulare:

Pomice naturale

Argilla espansa

Perlite espansa

Vermiculite espansa

Vetro granulare espanso

Calce-cemento cellulare

Vetro cellulare

Origine sintetica:

Struttura fibrosa:

Fibra di poliestere

Struttura cellulare:

Poliestere espanso sintetizzato

Poliestere espanso estruso

Poliuretano espanso

Polietilene espanso

Questa suddivisione non descrive in modo sufficientemente completo e approfondito la vasta gamma di materiali presenti oggi sul mercato. Non include infatti, tutti i tipi di materiali isolanti esistenti in commercio, poiché spesso anche gli isolanti di origine naturale presentano delle componenti di origine petrolchimica, oppure sono formati da materiali naturali di origine differente (isolanti minerali-sintetici, vegetali-sintetici, animali-sintetici, vegetali-minerali).

Una ulteriore suddivisione deriva dal processo produttivo:

- **Materiale naturali:** vengono impiegati così come sono offerti dalla natura, senza trasformazioni sostanziali, pur essendo anch'essi oggetto, prima della posa in opera, di alcune lavorazioni tendenti a dotarli dei requisiti appropriati a un determinato impiego, come taglio, lavaggio ecc.;
- **Materiali artificiali:** sono ottenuti mediante specifico processo produttivo tendente ad attribuire a una miscela di materie prime, opportunamente dosate, determinate caratteristiche.

Nella maggior parte dei casi dunque non è corretto parlare di materiali naturali, in quanto tutti i materiali isolanti subiscono un processo di trasformazione più o meno complesso.

In base alla consistenza e alla forma in cui si trovano in commercio si possono distinguere almeno dieci tipologie:

- Pannelli flessibili: fibra di legno, fibra di canapa, fibra di cocco, fibre di cellulosa, fibra di poliestere;
- Pannelli rigidi: fibra di legno, fibra di legno mineralizzata con cemento Portland, fibre di legno impregnate con resine o bitume, calce-cemento cellulare, vetro cellulare, polistirene espanso sinterizzato, polistirene espanso estruso, poliuretano espanso, polietilene espanso.
- Fibre sfuse: legno mineralizzato;
- Granuli sfusi: sughero naturale, sughero espanso, fibra cellulosa, argilla espansa, perlite espansa, vermiculite espansa, pomice, polistirene espanso;
- Granuli impastati;
- Rotoli: feltro di juta, sughero, lana di pecora;
- Stuoie: canna palustre;
- Fiocchi: fibra cellulosa;
- Schiume: poliuretano.
- Materassini: lana di vetro, lana di roccia.

Un elemento da tener presente nella scelta di un isolante naturale è il suo *impatto ambientale globale*, che deve essere valutato considerando le varie fasi del ciclo di vita del materiale. Una valutazione che considera le varie fasi di vita del materiale evidenzia il fatto che non tutti i materiali di origine naturale presentano bassi livelli di impatto ambientale. Le lane minerali, ad esempio, hanno un alto impatto sia nella fase di produzione, che nella fase di dismissione, poiché per essere prodotte necessitano di procedimenti con alto carico ambientale. Il loro riuso inoltre è difficoltoso, dal momento che il pannello deve essere intatto, senza contare il fatto che le lane minerali prodotte in Italia prima del 1995 sono probabilmente cancerogene. Anche la fibra di legno mineralizzata, nonostante sia principalmente di origine naturale, si presenta difficile da riutilizzare poiché la presenza del legante rende difficile ed inquinante la combustione del materiale, anche se una possibile forma di riuso potrebbe essere come inerte nel calcestruzzo.

2.2 Proprietà e prestazioni degli isolanti in architettura

L'isolamento termico degli edifici è diventato uno dei temi centrali del progettare secondo i principi dell'*energy conscious design*. Da circa trent'anni costituisce l'elemento chiave per il comportamento energetico dell'edificio; l'adozione di materiali isolanti, dal punto di vista termico e termoigrometrico, comporta infatti numerosi benefici, quali:

- La riduzione dei flussi termici attraverso l'involucro edilizio.
In inverno, per mantenere una temperatura confortevole negli ambienti interni non basta riscaldare l'aria: è necessario che la temperatura delle pareti sia abbastanza elevata da non diminuire la temperatura interna dell'ambiente. Tale effetto si ottiene **riducendo gli scambi termici** con l'esterno, e cioè **isolando** termicamente l'involucro dell'edificio. Questo ragionamento è valido sia per il riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo: minori sono gli scambi di calore tra ambiente esterno ed interno dell'edificio e minori saranno i consumi di energia per mantenere temperature di comfort negli ambienti interni.
- Il controllo delle temperature superficiali interne, finalizzato al soddisfacimento delle esigenze di comfort termico;
- Il controllo dei fenomeni di condensa superficiale;
- La riduzione delle fluttuazioni di temperatura in ambienti non climatizzati.

Fino a qualche tempo fa i materiali isolanti venivano valutati in base ai benefici apportati soprattutto, se non unicamente, nel periodo di riscaldamento; negli ultimi anni, visto i costi energetici del raffrescamento, l'attenzione si è focalizzata nel periodo estivo. Gli isolanti termici sono quindi diventati elementi di primo piano in edilizia, poiché un corretto isolamento degli edifici è la via più breve per ridurre drasticamente i consumi di energia e le emissioni legate alla climatizzazione degli ambienti interni.

I materiali isolanti termoacustici sono quei materiali utilizzati per ridurre la trasmissione di calore e suoni attraverso gli elementi dell'involucro dell'edificio o attraverso gli elementi divisorii interni. Questo tipo di materiali è caratterizzato da proprietà termofisiche, che influiscono direttamente sia sulle prestazioni invernali che su quelle estive dell'edificio, come, in particolare: la massa volumica, la conducibilità termica, il calore specifico.

È importante sottolineare che il comportamento dell'elemento dell'involucro in cui è inserito uno strato di materiale isolante è fortemente correlato alle caratteristiche complessive della stratigrafia e al posizionamento dell'isolante rispetto alla massa.

Oltre al comportamento termico e termoigrometrico, i materiali isolanti devono essere valutati anche rispetto agli altri aspetti.

I principali sono:

- Il comportamento acustico;
- Il comportamento al fuoco;
- Il comportamento in presenza d'acqua;
- Il comportamento alla compressione.

2.2.1 Comportamento termico in regime stazionario e variabile

L'analisi termica dei componenti di un involucro edilizio può essere affrontata secondo un approccio semplificato, cioè adottando un regime termico stazionario con grandezze costanti nel tempo e trascurando gli effetti legati all'accumulo termico della struttura o in regime variabile, in cui le grandezze sollecitanti variano nel tempo e la struttura interviene attenuando o ritardando l'onda termica grazie alle proprie caratteristiche di accumulo termico.

Il regime stazionario è sicuramente rappresentativo dei fenomeni di trasmissione del calore in periodo invernale o in presenza di edifici con bassa inerzia termica; ma quando le oscillazioni di temperatura giornaliere e la radiazione solare sono di entità rilevante risulta fondamentale passare a un'analisi in regime variabile. In regime stazionario, il parametro fondamentale che esprime la potenzialità della parete nel ridurre i flussi termici entranti o uscenti e nel controllare le temperature superficiali interne per soddisfare i requisiti di comfort termico ed evitare l'insorgenza di fenomeni di condensa superficiale è la *trasmittanza termica*.

Il parametro *trasmittanza termica* "*U-value*" (indicato spesso con il simbolo K), espresso in $[W/(m^2K)]$ o $[W/(m^2°C)]$, indica la quantità di calore che attraversa una certa superficie di un certo materiale, o per dirlo più tecnicamente è il flusso termico che in condizioni stazionarie attraversa $1m^2$ di componente di involucro per differenza unitaria di temperatura interna (θ_{ai}) ed esterna (θ_{ae}).

Si determina con la relazione:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Con

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

Dove:

R_{si} = resistenza termica superficiale interna $[(m^2K)/W]$ o $[(m^2°C)/W]$;

R_1, R_2, \dots, R_n = resistenze termiche di progetto dei vari strati $[(m^2K)/W]$ o $[(m^2°C)/W]$;

R_{se} = resistenza termica superficiale esterna $[(m^2K)/W]$ o $[(m^2°C)/W]$.

Le specifiche del calcolo di tale parametro si trovano nella norma UNI EN ISO 6946.

In particolare la *Resistenza termica di uno strato isolante*, la quale rappresenta la capacità del materiale di opporsi al passaggio di calore, si ottiene dalla relazione:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Dove:

d = spessore dello strato [m]

λ = conducibilità termica dello strato $[W/(mK)]$ o $[W/(m°C)]$

La **conducibilità termica** è quindi la proprietà fondamentale che caratterizza la prestazione termica di un materiale isolante, rappresentando il flusso termico indotto da una differenza di temperatura unitaria che, in regime stazionario, attraversa l'unità di spessore di materiale omogeneo in direzione perpendicolare alle linee isoterme. Indica quindi la capacità di trasmettere più o meno bene il calore. Più basso è il valore di conducibilità termica migliore è la prestazione isolante del materiale.

La conduttività dei materiali dipende, infatti, da numerosi fattori: ad esempio le condizioni di esercizio (temperatura e umidità in primo luogo), l'invecchiamento, le modalità di posa e le caratteristiche di produzione. Risulta, pertanto, fondamentale assumere nei calcoli un valore corretto.

A questo proposito esiste una norma, UNI EN ISO 10456, che specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali edilizi termicamente omogenei e permette inoltre, attraverso opportuni coefficienti, di convertire i valori di conducibilità ottenuti in determinate condizioni di temperatura e umidità nei rispettivi valori relativi a condizioni termoigrometriche differenti e, per alcuni materiali, di tenere conto di possibili effetti di invecchiamento.

Per molti materiali isolanti è, inoltre, possibile fare riferimento ai valori utili di calcolo (λ_m) riportati nella norma UNI 10351 che tengono conto di una maggiorazione percentuale rispetto ai valori misurati in laboratorio.

Purtroppo, se tali norme risultano piuttosto complete per i materiali isolanti convenzionali, mancano del tutto informazioni sulla maggioranza dei materiali ecocompatibili.

L'analisi termica in regime variabile è particolarmente complessa. Nel corso degli ultimi anni sono stati elaborati alcuni metodi semplificati, in particolare basati sull'analisi armonica, cioè con variazione sinusoidale, in un periodo di tempo definito, delle grandezze sollecitanti la parete (temperatura e flussi termici).

Relativamente a questo tipo di trattazione è stato messo a punto la norma UNI EN ISO 13786, che definisce le caratteristiche termiche e dinamiche dei componenti edilizi. In questo tipo di analisi diventa fondamentale la conoscenza, oltre che della conducibilità termica, anche dei valori di massa volumica e di calore specifico di ogni singolo materiale. La norma specifica che la prestazione dinamica dipende dal modo in cui i materiali sono accoppiati a livello stratigrafico, e quindi la metodologia non è applicabile ai singoli materiali. Le caratteristiche dinamiche sono rappresentate da numeri complessi, caratterizzato da un modulo e da una fase.

In generale, nel periodo estivo diventa importante l'effetto combinato delle tre proprietà prima citate (massa volumica¹, calore specifico² e conducibilità termica).

Un parametro che fornisce alcune importanti indicazioni sul comportamento termico del materiale in regime dinamico è la **Diffusività termica**, la quale rappresenta la capacità di un materiale di diffondere il caldo e il freddo, e la si ottiene dalla relazione:

$$a = \frac{\lambda}{\rho * c}$$

Dove :

a = diffusività termica [m²/s];

λ = conducibilità termica dello strato [W/(mK)] o [W/(m°C)];

ρ = massa volumica [kg/m³];

c = calore specifico [J/(kgK)] o [J/(kg°C)].

Questo parametro permette, quindi, di tenere conto non solo delle proprietà isolanti ma anche di quelle di accumulo del calore in un certo volume di materiale. Poiché tanto più è bassa la diffusività tanto più rapidamente e per distanze brevi si estingue al suo interno l'onda termica prodotta sulla superficie di un materiale, a parità di conducibilità termica e spessore, i materiali che presentano elevati calore specifico e massa volumica si comportano meglio in regime estivo.

2.2.2 Comportamento termoigrometrico

Indica la capacità di un materiale di lasciarsi attraversare o meno dal vapore. E' un fattore importante da considerare poiché incide direttamente sul comfort degli ambienti. Un involucro altamente impermeabile causa il ristagno del vapore all'interno dell'edificio, con una serie di problemi legati alla presenza di umidità che portano rapidamente al degrado dell'involucro e all'abbassamento delle condizioni di salubrità degli ambienti interni.

Una verifica importante, quando nella stratigrafia di un componente edilizio sia presente un materiale isolante, è quella relativa ai fenomeni di condensazione.

I componenti edilizi, infatti, sono interessati da fenomeni di diffusione del vapore acqueo a causa della naturale migrazione del vapore acqueo da ambienti a pressione di vapore maggiore verso ambienti a pressione di vapore minore.

Nel periodo invernale e in ambienti riscaldati, la differenza di pressione che si

¹ **La massa volumica** [kg/m³] è il peso in una unità di volume di un materiale. D'estate sono preferibili alti valori di massa volumica a parità di spessore e conducibilità termica. Aumentando la densità diminuisce la diffusività.

² **Il calore specifico** [J/kgK] è la quantità di calore necessaria per far variare di 1°C la temperatura di 1kg del materiale considerato. Indica l'attitudine di un materiale ad accumulare calore. D'estate sono preferibili alti valori di calore specifico a parità di spessore e conducibilità termica. Aumentando il calore specifico diminuisce la diffusività.

genera tra ambiente interno ed esterno causa la diffusione del vapore acqueo nelle pareti.

Tale fenomeno non presenta alcun inconveniente purché nel suo migrare il vapore acqueo non entri in contatto con materiali a temperatura tale da causarne la condensazione. Per una determinata temperatura la pressione di vapore non deve quindi raggiungere il valore di saturazione. Il fenomeno è estremamente complesso; tuttavia l'approccio convenzionale si basa sul metodo della temperatura di rugiada e di Glaser, che; seppur introducendo drastiche semplificazioni (non sempre accettabili) permette di effettuare l'analisi partendo dalla conoscenza delle proprietà termiche e igrometriche principali degli strati componenti.

Il metodo è oggetto della norma UNI EN ISO 13788, che permette di valutare il rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo e le relative condizioni al contorno da utilizzare nei calcoli.

La proprietà che caratterizza il comportamento igrometrico di un materiale è la **permeabilità al vapore acqueo**, definita come la portata di vapore acqueo che si diffonde attraverso un materiale omogeneo di spessore unitario in direzione perpendicolare alle isobare, per una differenza di pressione parziale di vapore unitaria, in determinate condizioni di temperatura e umidità [kg/msPa]. Alcuni valori si possono trovare nella norma UNI 10351.

Generalmente i produttori forniscono il valore del fattore di resistenza alla diffusione del vapore, indicato con il simbolo μ , dato dal rapporto tra la resistenza alla diffusione del vapore del materiale considerato quella di uno strato d'aria di uguale spessore, avente fattore di resistenza alla diffusione del vapore pari a 1. Esso è, quindi, un indice di quante volte è più grande la resistenza di un determinato strato di materiale rispetto a uno strato d'aria dello stesso spessore.

Materiali con μ inferiore a 10 consentono una diffusione elevatissima; da 10 a 50 una diffusione media; da 50 a 500 una diffusione limitata (freni al vapore, relativamente impermeabili); da 500 a infinito una diffusione tendente a zero (barriere al vapore, assolutamente impermeabili). Il fattore μ è un numero che non dipende dallo spessore dell'elemento considerato, ma è proprio del materiale. Dal valore μ si può calcolare la resistenza complessiva al vapore dello strato, indicato con il simbolo "sd" e misurata in metri, data dal fattore μ moltiplicato per lo spessore del materiale, che rappresenta lo spessore d'aria equivalente, cioè lo spessore d'aria che offrirebbe alla diffusione del vapore la stessa resistenza del materiale in questione.

2.2.3 Comportamento acustico

Dal punto di vista acustico un materiale isolante interviene a tre diversi livelli:

- sul fonoassorbimento;
- sul fonoisolamento per rumori che si propagano per via aerea;
- sul fonoisolamento per rumori che si trasmettono attraverso le strutture.

In relazione al **fonoassorbimento**, cioè alla capacità di assorbire il suono o rumore incidente, il parametro caratterizzante è il **Coefficiente di assorbimento acustico**, indicato con il simbolo α . È adimensionale, ed esprime il rapporto tra l'energia sonora assorbita e l'energia sonora incidente. Sono fonoassorbenti i materiali porosi dotati di struttura fibrosa o alveolare aperta; determinante risulta lo spessore del materiale e la sua applicazione. Un materiale assorbe in modo diverso suoni gravi, medi o acuti, 'per cui è necessario conoscere il coefficiente di assorbimento per le diverse frequenze (chiamato coefficiente di assorbimento acustico pratico, α_{ap} , determinato alle frequenze di 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz).

Al fine di un primo confronto tra materiali è possibile utilizzare un indice unico, rappresentato dal **Coefficiente di assorbimento acustico ponderato** α_w .

Il parametro che caratterizza, invece, il comportamento di un componente in merito alla sua capacità di ridurre la trasmissione del rumore aereo dall'ambiente disturbante all'ambiente disturbato (dall'esterno verso l'interno e tra ambienti contigui) è il **Potere fonoisolante** R , espresso in dB e dato dalla relazione:

$$R = 10 \log \frac{1}{t} \text{ [dB]}$$

Dove:

t = Coefficiente di trasmissione, ottenuto dal rapporto tra l'energia sonora trasmessa e l'energia sonora incidente.

Il potere fonoisolante indica dunque l'attitudine di un elemento costruttivo a impedire la propagazione del suono nell'aria; dipende essenzialmente dalla sua massa frontale, ma sono parametri influenti anche la stratigrafia, la permeabilità all'aria, la presenza e dimensione dei pori, il tipo di posa e ancoraggio. Esso varia in funzione della frequenza e quindi spesso viene riportato un valore unico dato dall'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w .

I materiali isolanti più adeguati per il fonoisolamento sono quelli ad alta densità. È importante sottolineare però che non ha senso riportare il potere fonoisolante riferito al singolo materiale, poiché è la stratigrafia complessiva che ne determina il valore.

Per quanto riguarda il fonoisolamento da rumori che si propagano per via strutturale, un aspetto importante è il rumore prodotto sui solai dal calpestio. A tal fine il parametro che indica il grado di isolamento di un orizzontamento da rumori impattivi trasmessi per via strutturale è il **livello di pressione sonora di calpestio**, definito come il livello medio di pressione sonora nell'ambiente disturbato quando sul pavimento di quello disturbante agisce un generatore di calpestio normalizzato.

Per valutare il grado di isolamento da rumore di calpestio di un rivestimento di pavimento si definisce l'attenuazione del livello di rumore di calpestio ΔL , misurata sempre in dB e particolarmente utile per valutare l'effetto dell'isolamento rispetto al rumore trasmesso in assenza di esso. Come il coefficiente di assorbimento acustico anche il livello di pressione sonora di calpestio, varia alle diverse frequenze; tuttavia, anche in questo caso si può fare riferimento all'indice unico ΔL_w .

Come per il potere fonoisolante, anche per l'indice di attenuazione del rumore di calpestio non è, quindi, corretto riferirsi al singolo materiale ma sempre all'intero elemento costruttivo, poiché il valore può essere più o meno elevato a seconda dei diversi materiali che fanno parte del "pacchetto". In particolare, un confronto tra isolanti è significativo solo a parità di caratteristiche dell'orizzontamento. Testare il materiale all'interno di una struttura poco isolata acusticamente ha come risultato un indice di attenuazione più elevato; al contrario, se il materiale è inserito in una struttura già di per sé isolata, l'attenuazione è di minore entità.

2.2.4 Comportamento al fuoco

Tutti i materiali da costruzione, e dunque anche i materiali isolanti, ai fini della prevenzione incendi sono soggetti a una classificazione di reazione al fuoco, caratteristica che indica il grado di partecipazione di un materiale al fuoco cui è sottoposto. Dal 2005 si sostituisce alla classificazione italiana espressa numericamente - classe 0, 1 ecc. - quella europea (Euroclassi) in lettere: A, B ecc. Oltre alla classe di reazione al fuoco vera e propria vengono attribuiti altri codici che identificano il comportamento dei materiali in termini di livello di produzione di fumo (s – da *smoke* - seguito da numero) e di rilascio di gocce o particelle ardenti (d - da *drops* – seguito da numero) e di applicabilità (ad esempio FL- da *floor* - se utilizzabili come rivestimenti di pavimenti).

La reazione al fuoco dei materiali isolanti e il loro comportamento in caso di incendio è estremamente varia, a seconda del materiale di base e delle sostanze a questo aggiunte (resine, leganti, additivi, agenti espandenti).

Di fondamentale importanza, inoltre, sono l'applicazione e la modalità di messa in opera del materiale: un materiale combustibile può, infatti, presentare un buon comportamento al fuoco se collocato correttamente all'interno dell'elemento edilizio.

Euroclassi (reazione al fuoco)					
Classi	Contributo energetico alla propagazione di un incendio	Classificazione complementare			
		Produzione di fumo		Caduta di gocce e particelle ardenti	
A1	Incombustibile	-	-	.	-
A2	Praticamente incombustibile	S1	Ridotta Produzione di fumo	d0	Assenza di gocce/ Particelle ardenti
B	Resiste a un attacco prolungato delle fiamme e di un oggetto ardente isolato limitando la propagazione dell'incendio	S2	Produzione media di fumo	d1	Gocce/particelle ardenti persistenti per meno di 10 secondi
C	Resiste a un attacco breve delle fiamme e di un oggetto ardente isolato limitando la propagazione dell'incendio				
D	Resiste a un attacco breve di piccole fiamme limitando la propagazione dell'incendio e di un oggetto ardente isolato	S3	Produzione importante di fumo	d2	Gocce/particelle ardenti persistenti per più di 10 secondi
E	Resiste a un attacco breve di piccole fiamme limitando la propagazione dell'incendio				
F	Nessuna prestazione determinata				

Tabella 1: Euroclassi

2.2.5 Comportamento in presenza d'acqua

La valutazione del comportamento del materiale isolante in presenza di acqua o umidità è estremamente importante, poiché il materiale può subire modificazioni sia dal punto di vista fisico, - riguardanti ad esempio il peso, la resistenza meccanica, la conducibilità termica – sia per la maggiore attaccabilità chimica e biologica che si verifica in ambienti umidi.

In presenza di acqua i parametri da considerare sono:

- l'assorbimento d'acqua per immersione per lungo periodo (28 giorni), con

immersione del provino parziale (espresso in kg/m^2), per simulare l'assorbimento causato da esposizione all'acqua per lungo periodo, o totale (espresso in volume percentuale), caso non direttamente correlato alle condizioni in loco, ma riconosciuto rilevante per alcuni prodotti in alcune applicazioni;

- l'assorbimento d'acqua per immersione parziale dei provini per breve periodo (24 ore), che intende simulare l'assorbimento d'acqua, calcolato in kg/m^2 , causato da un periodo di pioggia di 24 ore durante i lavori di costruzione;
- l'assorbimento d'acqua per diffusione per lungo periodo (28 giorni), espressa in kg/m^2 o in volume percentuale, che intende simulare l'assorbimento d'acqua da parte di prodotti sottoposti a elevate umidità relative (prossime al 100%) su entrambi i lati, e soggetti a gradienti di pressione di vapore acqueo per lungo periodo, per esempio nel caso di tetto rovescio o di isolamento non protetto dal terreno.

Il comportamento in presenza di umidità è estremamente complesso e dipende fortemente dalle caratteristiche del materiale.

L'assorbimento espresso in volume percentuale che un materiale subisce quando è posto in un ambiente saturo di umidità si definisce **igroscopicità**.

Materiali diversi definiti igroscopici possono avere in presenza di umidità un comportamento assai diverso, poiché diverso è il fenomeno fisico che si genera. In alcuni materiali, infatti, la singola fibra è impermeabile e l'acqua va a riempire gli interstizi tra le fibre sostituendosi all'aria, con conseguente drastica riduzione della capacità isolante del materiale; in altri l'acqua viene assorbita dalle singole fibre e l'aria rimane negli spazi interstiziali tra le fibre, con conseguente incremento di volume ma minore effetto sulle caratteristiche di isolamento termico.

2.2.6 Comportamento a compressione

Nelle applicazioni in cui il materiale isolante è soggetto a carichi, cioè soprattutto quando impiegato in copertura e a pavimento, la conoscenza del comportamento a compressione è estremamente importante. I parametri che caratterizzano tale comportamento sono la sollecitazione a compressione al 10% di deformazione, indicata con il simbolo α_{10} ed espressa in kPa e la resistenza a compressione α_m , espressa sempre in kPa.

In generale la resistenza a compressione aumenta al crescere della massa volumica del materiale.

2.3 Modalità di intervento

L'isolamento è un'operazione che deve essere realizzata con cura. Un isolamento inadeguato o installato in modo errato o una parete non trattata correttamente, riducono le prestazioni dell'insieme.

L'isolamento termico interessa l'intero involucro dell'edificio, vale a dire tutte le superfici che delimitano un volume riscaldato rispetto ad un ambiente non riscaldato. Si coibentano quindi i muri perimetrali, i sottotetti, i basamenti e le fondazioni e le pareti (muri, tramezzi) o solai che insistono su locali non riscaldati come cantine, garage o scale di servizio. L'intero complesso abitativo deve costituire un complesso perfettamente isolato, indipendente dagli ambienti non riscaldati, siano essi volumi edilizi o l'ambiente esterno.

L'isolamento dei solai controterra può creare problemi nell'ambito di un progetto di ristrutturazione. Infatti l'isolamento di questo tipo implica il rifacimento delle pavimentazioni.

In un'abitazione monofamiliare isolata correttamente, le dispersioni attraverso i solai controterra rappresentano circa il 15% ÷ 20% di quelle totali all'interno dell'abitazione. È dunque utile effettuare un'analisi costi-benefici e comparare il sovrapprezzo con la spesa annua dovuta al riscaldamento prima e dopo l'intervento. In questo modo è possibile stabilire il tempo di ritorno dell'investimento.

Le modalità di inserimento degli isolanti rispetto all'involucro dell'edificio sono tre:

- posa in opera dell'isolante sulla faccia esterna dell'involucro (detto a *cappotto*);
- posa in opera dell'isolante in una intercapedine;
- posa in opera dell'isolante sulla faccia interna dei locali.

Granuli sfusi, schiume e materassini sono idonei alla posa in opera in intercapedini, mentre pannelli flessibili e pannelli rigidi sono idonei alla posa in opera su faccia interna ed esterna.

2.3.1 Isolamento applicato dall'interno

Costituisce la soluzione più diffusa in Francia, soprattutto in caso di ristrutturazione parziale, per costi ragionevoli e una posa in opera relativamente semplice. In Italia questa pratica è meno diffusa e si preferisce coibentare dall'esterno o all'interno di pareti con intercapedini a "casa vuota".

Nella posa dall'interno i materiali vengono posati in corrispondenza dei muri esterni, dei sottotetti e dei muri controterra, sulla superficie interna dell'involucro edilizio o del muro di confine tra ambiente riscaldato e non riscaldato. Questa soluzione presenta numerosi inconvenienti. Lo spessore degli isolanti può ridurre sensibilmente la superficie abitabile. L'inerzia termica del muro non viene sfruttata. I ponti termici sono

numerosi e la loro eliminazione risulta difficoltosa, con rischi di condensazione all'interno delle pareti. Tuttavia, questo tipo di isolamento permette di ottenere un rivestimento impeccabile della parete interna, indipendentemente dallo stato del muro di origine.

2.3.2 Isolamento applicato dall'esterno

È la soluzione più diffusa soprattutto in fase di ristrutturazione totale di una parte dell'involucro (es. facciata, copertura).

Un isolante viene posato sulla superficie esterna della facciata (isolamento "a cappotto") e finito con un intonaco o un rivestimento. Per realizzare un isolamento a cappotto è importante rivolgersi a un posatore specializzato per non incorrere in problemi anche gravi a causa di pose scorrette (crollo di facciate, crepe della copertura ecc.).

Questo tipo di posa è di gran lunga quella che garantisce migliori prestazioni, poiché elimina di fatto praticamente tutti i ponti termici e il comfort interno viene migliorato grazie allo sfruttamento dell'inerzia termica della muratura. Lo svantaggio è nella minore durata dello strato del rivestimento di facciata rispetto alle soluzioni tradizionali che presentano spessori molto più elevati. Inoltre le per azioni di manutenzione possono risultare più dispendiose. Per fissare elementi esterni quali luci, tendoni ecc., vengono commercializzati elementi speciali coibenti ad alta resistenza a compressione che vengono incastonati e incollati all'interno del cappotto e utilizzati per il fissaggio di tasselli.

2.4 Certificazione e etichette degli isolanti

Prima di scegliere un isolante, è indispensabile conoscerne le caratteristiche fisiche (coefficienti di conduttività termica λ e resistenza R) e di impatto sull'ambiente e la salute.

Si possono trovare i dati necessari sulle schede tecniche prodotti. Queste riportano una serie di informazioni specifiche, dai valori necessari per il calcolo piuttosto che alle preoccupazioni da rispettare in fase di messa in opera dei prodotti ai fini della sicurezza.

Ogni prodotto è corredato di una serie di marchi obbligatori (comuni nella UE) e certificazioni di conformità a sicurezza del consumatore, rilasciati da enti verificatori accreditati e ufficialmente riconosciuti; alcune di queste sono obbligatorie, altre facoltative.

Per poter circolare in Europa, i prodotti industriali devono rispettare caratteristiche e requisiti specifici stabiliti per normativa e dalle direttive europee. La certificazione del prodotto è obbligatoria ed è emessa, a tutela dell'utente, a garanzia del rispetto di tali requisiti minimi.

Moltissime case produttrici, ai fini di mettere in commercio prodotti di alta qualità e

a basso impatto ambientale, vanno oltre ai limiti di legge e si dotano di certificazioni non obbligatorie ma facoltative, rilasciate da organismi ed enti europei accreditati. La comunità Europea, per far fronte agli impegni internazionali in tema di sostenibilità ambientale, ha introdotto, tra le altre cose, marchi ufficiali per contraddistinguere prodotti di alta qualità a basso impatto ambientale. Il loro uso è consentito a seguito di particolari iter procedurali e di verifiche e di rilascio di relativo certificato da parte di enti accreditati. L'elenco dei prodotti certificati è reso pubblico a tutela del consumatore.

I prodotti immessi sul mercato europeo sono obbligatoriamente dotati della marcatura CE che attesta che attesta la conformità ai requisiti minimi essenziali, in particolare di sicurezza, definiti dalle specifiche direttive europee.

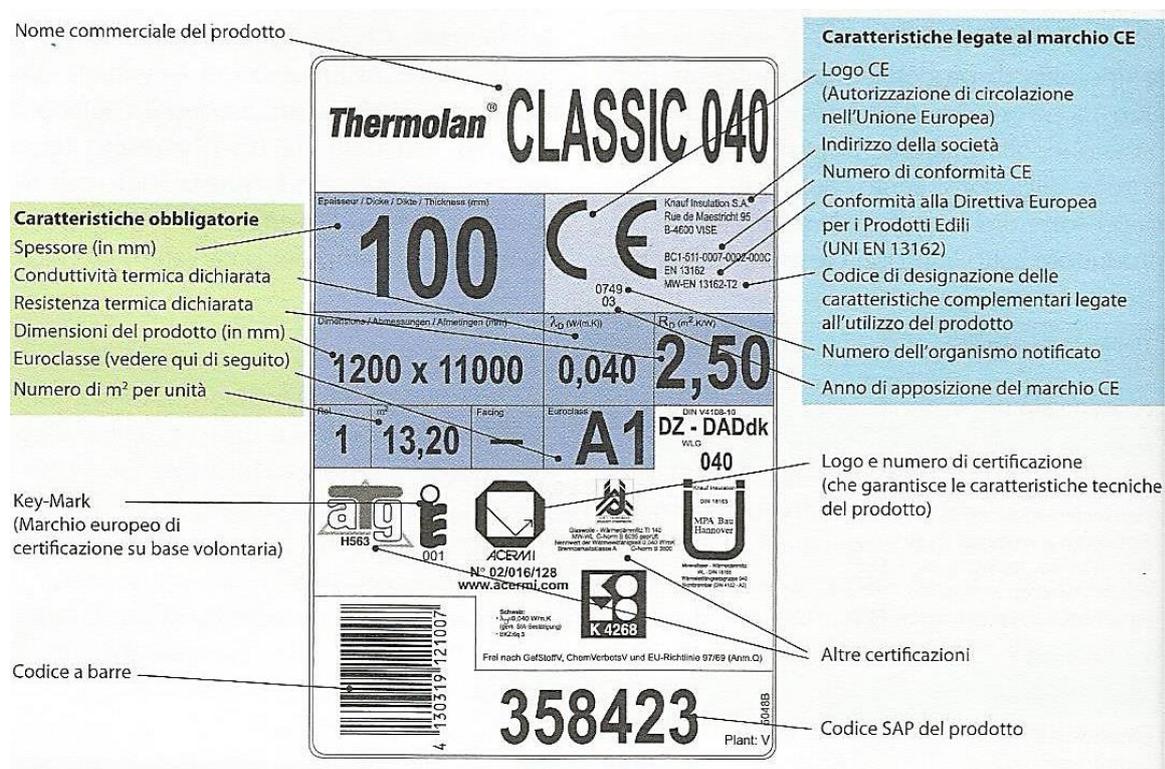


Fig. 2.1 Esempio Etichetta CE degli isolanti

I materiali di isolamento portanti, quali il calcestruzzo cellulare o i blocchi in laterizio, beneficiano, oltre alle caratteristiche di resistenza termica di una certificazione che attesti anche le caratteristiche meccaniche necessarie ai fini del calcolo statico della struttura.

Oltre alla designazione del prodotto, al marchio e ai dati del produttore, la marchiatura CE indica la resistenza termica e i λ_D dichiarati, le dimensioni, la tolleranza di spessore e la classe di reazione al fuoco. A seconda della tipologia di

prodotto, possono comparire altre menzioni come la resistenza alla compressione, alla trazione, al passaggio del vapore e all'assortimento dell'acqua. Questi valori sono dichiarativi, vale a dire forniti dal produttore sotto la propria responsabilità. Per essere certi delle prestazioni di un isolante, occorre verificare la presenza sull'etichetta del marchio CE.

2.5 Fissaggio

Il sistema di fissaggio partecipa alla conduzione del calore creando un ponte termico nella costruzione. È possibile distinguere tre tipi di fissaggio in base alla forma.

- ***Nessun fissaggio meccanico:*** i materiali sfusi sono iniettati, riportati o semplicemente usati come tamponamento, necessitano di un piano di appoggio fisso o di un volume delimitato su due lati.
Questo tipo di posa evita la formazione di ponti termici, ma può dare origine a cavità non coibentate, a causa ad esempio dello schiacciamento dello strato isolante, che devono essere raggiunte in una fase successiva.
- ***Fissaggio meccanico puntuale:*** il materiale isolante, sotto forma di fogli o pannelli può essere inchiodato, avvitato, tassellato o incollato puntualmente. Gli elementi passanti metallici, necessari ad esempio al ritegno di un involucro protettivo, influiscono negativamente.
- ***Fissaggio meccanico superficiale:*** l'isolamento in veli o pannelli è fissato saldamente su tutta la superficie del piano di supporto, ad esempio mediante bitume o malta adesiva.

2.6 Bilancio ecologico

Un bilancio è, per definizione, un prospetto riassuntivo degli aspetti positivi e negativi di una determinata situazione; il termine “***bilancio ecologico***” indica un prospetto complessivo e comparato degli effetti, positivi e negativi, di un determinato prodotto sull'ambiente.

La EN ISO 14040-4 introdotta nel 2000 definisce il bilancio ecologico come “***Life Cycle Assessment***” (LCA), e ne converte il potenziale in effetti (ad esempio in emissioni) basando il calcolo sul flusso di materia. Esso si fonda sull'analisi dell'intero ciclo di vita di un materiale, dal reperimento delle materie prime al processo produttivo, dai trasporti alla lavorazione, dall'utilizzo alla dismissione.

Emerge dunque l'assoluta importanza della dimensione temporale: un prodotto nasce, cresce, si trasforma, invecchia e muore, e in questo processo lascia dei segni sull'ambiente e su di noi.

La normativa non si riferisce solo ai prodotti per l'edilizia, ma può essere applicata a ogni processo, anche a una fornitura di servizi, a un metodo di produzione e a una unità economica come ad esempio un'impresa.

Per facilitare la scelta e chiarire se il prodotto che si pensa di acquistare sia rispettoso dell'ambiente, a parità di prestazioni isolanti è preferibile un materiale con bassa energia inglobata, definita anche "*Energia Grigia*". Si tratta della quantità di energia totale necessaria all'elaborazione di un prodotto, dal momento dell'estrazione delle materie prime, del loro trattamento e della loro trasformazione fino alla loro posa in opera. Anche i successivi trasporti necessari nel processo di elaborazione e i consumi energetici relativi ai materiali e alle apparecchiature vengono presi in considerazione.

Uno stesso materiale non presenterà la stessa energia grigia a seconda che esso venga prodotto localmente oppure importato.

L'energia grigia viene indicata in joule o kilowattora per metro cubo. Essa tende a valutare la quantità reale di energia utilizzata per fabbricare un prodotto: ciò rappresenta un indicatore ecologico rilevante, soprattutto per conoscere le emissioni di CO₂. Tuttavia, dovranno essere considerati altri criteri, tra cui la durata e il ciclo di vita del prodotto e la possibilità di riciclarlo o meno. Il criterio dell'energia grigia preso singolarmente risulta poco significativo, in particolare in relazione ad un edificio. La valutazione deve sempre essere effettuata in termini di bilancio ecologico.

Infatti, un materiale caratterizzato da una bassa energia grigia può avere una durata di vita breve e necessita di energia per la manutenzione o per l'utilizzo nel corso del suo ciclo di vita per finire poi come rifiuto non riciclabile. Viceversa, un materiale può consumare molta energia grigia nella fase iniziale, ma non richiedere alcuna manutenzione e terminare il proprio ciclo come materiale riciclabile, biodegradabile o come rifiuto inerte innocuo per l'ambiente.

Ad esempio, l'alluminio siderurgico è il materiale utilizzato in un edificio che richiede la maggiore energia grigia, pari a 195000 [kWh/m³]. Tuttavia, esso è facilmente riciclabile con un consumo del 10% dell'energia necessaria alla sua fabbricazione. I mattoni consumano un'energia grigia elevata, ma la durata della loro vita utile è estremamente lunga e, al termine di questa, essi diventano rifiuti inerti.

È importante considerare che i metodi di calcolo dell'energia grigia di un materiale possono variare da un produttore all'altro. Al fine di poter effettuare confronti, è preferibile utilizzare le medesime fonti. I valori non devono essere interpretati tassativamente, ma per ordine di grandezza. Il fattore trasporto può generare delle disparità rilevanti, a seconda dei Paesi e delle regioni. Ad esempio, in Francia, i blocchi di calcestruzzo vengono diffusi attraverso una produzione distribuita su tutto il territorio, generando in questo modo un livello di energia grigia abbastanza ridotto per questo materiale.

Per un materiale da costruzione è fondamentale approfondire la fase di utilizzo, poiché all'interno di questa specifica fase rientra il problema della salubrità degli ambienti interni. Durante il periodo di vita utile si evidenziano aspetti che rendono tali materiali differenti da altre tipologie di prodotto.

Consumo di energia grigia di diversi materiali edili (in kWh/m³)			
Metalli		Materiali Isolanti	
Ferro	25000	Lana di vetro	250
Acciaio	63000	Lana di roccia	150
Alluminio	195000	Lana di canapa	30
Rame	133000	Lana di legno	13
Zinco Titanio	180000	Lana di di pecora	55
Muri		Ovatta e lana di cellulosa	6
Blocco cavo di calcestruzzo	410	Cellulosa di legno	50
Mattone pieno	1200	Fibre di lino	30
Laterizio forato	700	Fibre di canapa	40
Blocchi portanti in laterizio	675	Piume	50
Mattone silico-calcareo forato	350	Argilla Espansa	300
Mattone silico-calcareo di rivestimento	500	Perlite/vermiculite	230
Calcestruzzo cellulare	300	Sughero espanso	80
Calcestruzzo 350 kg/m ³	900	Pannelli in fibra di legno	1400
Calcestruzzo armato	1850	Polistirene espanso	450
Calcestruzzo	500	Polistirene estruso	850
Calcestruzzo alleggerito (argilla espansa)	450	Poliuretano	1100
Blocchi di calcestruzzo pieni	700	Vetro cellulare	1600
Intonaci		Carpenteria	
Intonaco dicalce	450	Legname edile	180
Intonaco di gesso	700	Legno lamellare incollato	2200
Intonaco di cemento	1100	Pareti divisorie	
Intonaco sintetico	3300	Lastra in gesso cartonato	850
Coperture		Pannelli a base di legno	2200
Tegola di laterizio	500	Materie Plastiche	
Tegola di calcestruzzo	1400	PVC	13000
Tegola di fibrocemento	4000	Polipropilene	7400

Tabella 2: I consumi di energia grigia dei materiali edili

Generalmente il bilancio ecologico si compone di tre parti, che si compongono attraverso una serie precisa di cicli iterativi.

- Il bilancio specifico individua i processi di trasformazione energetica e dei corpi che sono necessari al prodotto e alla sua fabbricazione.

I limiti del bilancio, i cosiddetti criteri di arrotondamento, sono solitamente impostati sul valore minimo dell'1% della massa materica e del fabbisogno di energia primaria. Per i materiali che sono ecologicamente sospetti (ad esempio i

plastificanti dei materiali sintetici) i criteri di arrotondamento devono essere verificati singolarmente.

- Il bilancio degli effetti considera le emissioni causate nel corso di tutte le trasformazioni energetiche e di materiale (ad esempio il contributo all'effetto serra) e la identifica attribuendo a ciascuna di loro il valore equivalente di un agente inquinante principale tra quelli che causano l'effetto.

	Effetto serra [CO2 eq]	Tempo di permanenza in atmosfera [a]	Aumento di concentrazione in epoca industrializzata
Biossido di Carbonio (CO₂)	1	50-200	28%
Metano (CH₄)	21	9-15	146%
Protossido di azoto (N₂O)	310	120	13%
Fluorocarburo (CF₄ e altri)	6500	50000	Da 0ppt a 72ppt
Trifluorometano (CHF₃ e altri)	11700	264	n.d.
Esafluoruro di zolfo (SF₆)	23900	3200	Da 0ppt a 3-4ppt

Tabella 3: Emissioni
ppt = Parti Per Trilione

La quantità di energia incorporata nel prodotto edilizio va esaminata, oltre che in relazione alla quantità di energia necessaria per l'acquisizione delle materie prime, per la produzione, l'uso e lo smaltimento del prodotto, anche in relazione ai risparmi energetici che tale prodotto consente di ottenere una volta incorporato alla costruzione. Proprio i materiali isolanti, a fronte di rilevanti consumi energetici necessari per la produzione, possono consentire risparmi sui costi di esercizio dell'edificio. Nella valutazione devono essere prese in considerazione le modalità di posa e installazione, che possono modificare le prestazioni, cosa che non avviene necessariamente per altri prodotti industriali.

- L'analisi è composta dall'individuazione del tema di fondo, dalla valutazione e dalla rappresentazione dei risultati. In questo modo è possibile valutare anche le informazioni che non entrano nel bilancio e che non sono trascurabili, come ad esempio le emissioni in fase di utilizzo e la durevolezza. Serve inoltre a comunicare le raccomandazioni per la fase di utilizzo del prodotto.

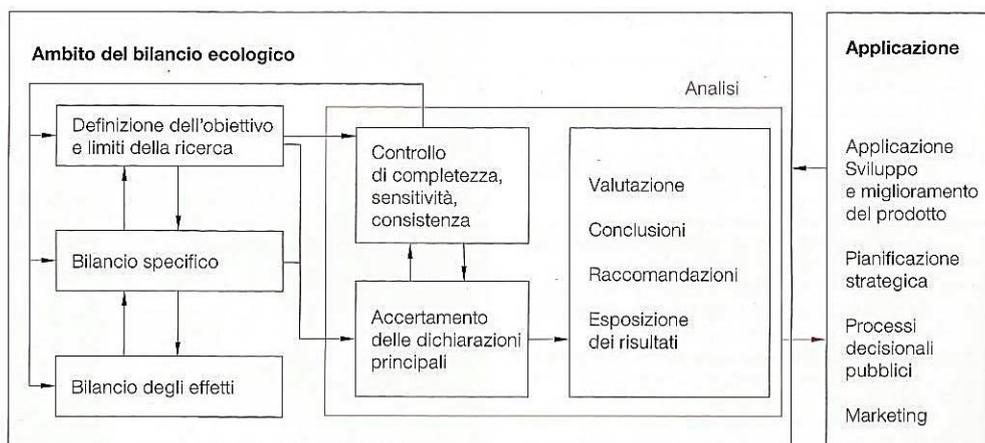


Fig. 2.2 Procedura di redazione di un bilancio ecologico

La “tavola rotonda per l’edilizia sostenibile” promossa in Germania dal Ministero federale dei trasporti, dell’edilizia e dello sviluppo urbano (BMVBS) ha stabilito le categorie generali per l’individuazione degli effetti ambientali dei materiali da costruzione:

- Contenuto di energia primaria rinnovabile/non rinnovabile, PEI (MJ);
Si riportano alcuni consumi di energia primaria in MJ/kg per materiali di origine diversa:
 - Fibra cellulosa: 2,94 MJ/kg.
 - Fibra di legno mineralizzata con cemento Portland: 5,40 MJ/kg .
 - Lana di vetro: 34,60 MJ/kg.
 - Poliuretano espanso: 126,20 MJ/kg.
- Potenziale di riscaldamento globale (Global Warning Potential - GWP³) (kg CO₂ eq.);
- Potenziale di distruzione dell’ozono (Ozone Depletion Potential – ODP) (kg CCL₃F eq.);
- Potenziale di acidificazione (Acidification Potential – AP) (kg SO₂ eq.);
- Potenziale di eutrofizzazione (Entrophication Potential – EP);
- Potenziale di formazione fotochimica dell’ozono (Photochemical Ozone Creation Potential – POCP) (kg C₂H₄ eq.).

In futuro i risultati del bilancio ecologico del materiale da costruzione saranno indicati nella European Product Declaration – EPD come strumento aggiuntivo di valutazione (vedi paragrafo 7.3). Gli effetti delle singole categorie non possono essere sommati tra loro per ottenere un valore complessivo generalmente valido e di conseguenza si presenta il problema della ponderazione dei singoli parametri: un’interpretazione riassuntiva può

³ GWP: indice caratteristico di effetto serra di ogni fluido calcolato rispetto al CO₂, a cui viene attribuito valore unitario, e integrato nell’arco di tempo di 100 anni.
Esempio: l’HFC-134a, ha un GWP pari a 1430, cioè per ogni kg di HFC-134a emesso in atmosfera porta allo stesso effetto di 1430 kg di CO₂ dispersi in atmosfera.

essere ottenuta solo con grande difficoltà. Alcuni Paesi europei hanno sviluppato alcuni standard che permettono l'elaborazione del bilancio energetico attraverso la definizione di un unico parametro generale riassuntivo, tuttavia i modelli di calcolo e la ponderazione dei parametri dipendono da direttive di natura politica e non sono perciò obbligatoriamente certi dal punto di vista scientifico. In Germania l'Ufficio federale per l'ambiente ha elaborato un metodo di catalogazione e di valutazione delle categorie d'influenza: nella valutazione entrano in gioco le dimensioni dell'effetto (globale – locale; permanente – temporaneo), lo stato attuale dell'ambiente nell'ambito delle categorie d'azione (minaccioso – privo di rischi) e anche l'apporto delle categorie d'azione all'esposizione totale sul territorio tedesco (grande – piccolo).

In base ai limiti assegnati al bilancio i risultati dell'analisi del ciclo di vita possono variare modificando di conseguenza anche le conclusioni.

Le considerazioni del bilancio energetico rappresentano una base per tutte le scelte di carattere costruttivo e materico.

2.7 Ciclo di vita e fattori a rischio

Il ciclo di vita di un materiale isolante può essere suddiviso nelle seguenti fasi principali:

1. Approvvigionamento delle materie prime;
2. Processo produttivo;
3. Lavorazione e messa in opera;
4. Esercizio;
5. Dismissione.

Impatti sull'ambiente e sulla salute possono verificarsi in ogni fase.

Per quanto riguarda gli impatti sulla salute, nelle fasi di approvvigionamento delle materie prime (fase 1), di produzione (fase 2), di lavorazione e messa in opera (fase 3) e dismissione (fase 5) prevalgono quelli riguardanti la salute dei lavoratori, mentre rischi per la salute degli abitanti sono concentrati durante la fase di esercizio, ossia di permanenza del materiale nell'edificio (fase 4), che è tuttavia la fase più lunga.

I principali fattori di rischio che si possono riscontrare nelle diverse fasi del ciclo di vita di un materiale isolante possono essere così evidenziati:

1. Approvvigionamento delle materie prime:
 - consumo di risorse naturali e trasporti;
 - degrado del territorio;
2. Processo produttivo:
 - consumo di energia (processo produttivo e trasporti/distribuzione);
 - inquinamento (aria, acqua e suolo);

- insorgenza di disturbi per gli addetti alla produzione;
3. Lavorazione e messa in opera:
- emissioni nocive per maneggiamento o inalazione;
 - produzione di sfridi e scarti di lavorazione;
4. Esercizio:
- emissioni nocive a breve o lungo termine;
5. Dismissione:
- perdita di risorse naturali parziale o totale (dovuta all'impossibilità o alla difficoltà di riutilizzo, recupero, riciclaggio o reinserimento nell'ambiente);
 - consumo di energia per la dismissione;
 - inquinamento (aria, acqua e suolo);
 - degrado del territorio (discariche e impianti di incenerimento).

La valutazione di questi fattori è estremamente difficile, poiché deve tener conto di aspetti tra loro assai diversi. Può essere di tipo *qualitativo* - ossia basata su pareri di esperti – oppure *quantitativa*, cioè relativa a misurazioni precise delle quantità in gioco: materie prime utilizzate, energia consumata, emissioni e rifiuti. Quest'ultimo tipo di valutazione risulta molto complessa perché richiede una grande quantità di dati difficilmente quantificabili, che le aziende fanno fatica a produrre. Inoltre si corre il rischio che un tipo di valutazione quantitativa possa nascondere comunque tra i numeri situazioni ambientalmente non sostenibili.

Una combinazione dunque di valutazioni qualitative (con il monitoraggio delle aree di impatto più importanti e la valutazione dei loro potenziali effetti) e dell'analisi quantitativa di parametri selezionati sembra essere la soluzione migliore per trarre delle conclusioni corrette.

Vengono quindi individuati i fattori di rischio più significativi per i diversi materiali.

Vediamo nel dettaglio i principali fattori di rischio legati al ciclo di vita dei materiali isolanti.

2.7.1 Approvvigionamento delle materie prime

Consumo di risorse naturali e trasporti.

Un problema molto urgente è quello dell'utilizzo irrazionale delle risorse naturali, con il conseguente rischio di esaurimento. Le risorse non rinnovabili sono quelle la cui disponibilità sul pianeta è sempre più scarsa, perché non sono rigenerabili se non in tempi geologici (petrolio, olii, gas naturale, carbone, materiali rocciosi). In particolare, lo sfruttamento del petrolio non solo implica il rischio di un suo esaurimento e di grave inquinamento ambientale legato ai processi di trasformazione; implica anche una lotta spietata tra Stati, potenze economiche, multinazionali ed eserciti perché l'approvvigionamento del petrolio è stato, ed è, la causa prima dei tanti conflitti di questi ultimi anni.

Dire che è necessario ridurre drasticamente l'utilizzo di risorse non rinnovabili a favore di quelle rinnovabili è importante ma non sufficiente, perché:

- una risorsa può essere non rinnovabile ma di disponibilità pressoché illimitata, non ancora utilizzata o distribuita ampiamente sulla crosta terrestre;
- una risorsa rinnovabile, come nel caso di alcuni legnami, può essere di limitata disponibilità, non essere presente localmente e avere tempi di rigenerazione molto lunghi.

È dunque importante considerare anche la disponibilità della materia prima e la facilità di reperimento, incoraggiando l'utilizzo di materiali di produzione locale al fine di ridurre in maniera consistente i costi di trasporto e di distribuzione.

L'utilizzo di materie prime riciclate e il riutilizzo degli inevitabili sfridi di lavorazione all'interno della fase produttiva possono concorrere in modo determinante al risparmio delle risorse.

ISOLANTI SINTETICI:

Impatto molto elevato, perché derivano dall'estrazione e dalla lavorazione del petrolio. Però i prodotti isolanti in fibra di poliestere, che derivano per gran parte da poliestere riciclato (bottiglie in PET provenienti dalla raccolta urbana differenziata) hanno un impatto di modesta entità.

ISOLANTI MINERALI:

Impatto modesto, in quanto derivano da materie prime molto diffuse e disponibili in abbondanza (sabbie quarzifere, argilla, minerali di origine vulcanica).

L'approvvigionamento della materia prima può essere causa di deturpamento del territorio; alcune cave vengono ripristinate a verde, ma il ripristino ambientale non è sempre possibile e concretamente realizzato. L'estrazione dovrebbe essere limitata e si dovrebbe prevedere la chiusura e l'idoneo rinverdimento delle cave prima di intaccare l'immagine paesaggistica del territorio.

ISOLANTI VEGETALI:

alcuni materiali derivano da materie prime facilmente rigenerabili (canapa, kenaf, lino, mais, canna palustre, cocco, juta): altri da materie prime riciclate e da scarti di lavorazione (cellulosa e legno). Per la fibra di legno è importante verificare che non vengano utilizzati legnami provenienti da foreste tropicali; il sughero è una materia prima rigenerabile ma di limitata disponibilità, poiché la pianta può essere decorticata solo ogni 8-10 anni. È importante segnalare che per la produzione di alcuni particolari prodotti (canapa, kenaf, cellulosa e in alcuni casi lino) viene aggiunta alla fibra vegetale una percentuale di fibra sintetica (generalmente poliestere) in misura del 10-15% (anche se in alcuni casi si arriva al 30-50%) con funzione di sostegno e rinforzo; questo è un aspetto da considerare in un bilancio ambientale, pur essendo la quantità di petrolio usata per produrre la fibra di poliestere proporzionalmente trascurabile.

ISOLANTI ANIMALI:

la lana di pecora è una materia prima rigenerabile; può però provenire da luoghi molto lontani (Nuova Zelanda). Alcuni prodotti contengono una griglia di rinforzo in polipropilene.

2.7.2 Processo produttivo

➤ *Consumo di energia.*

Il processo produttivo del materiale è la fase che richiede il maggior dispendio di energia, utilizzata per i processi termici necessari per la lavorazione delle materie prime. I forni (di espansione, essiccazione, ecc.) vengono alimentati quasi del tutto da combustibili fossili non rinnovabili; in pochissimi casi vengono utilizzati forni elettrici.

Inoltre, di tutta l'energia consumata solo una piccola parte viene effettivamente utilizzata per la trasformazione del materiale; la maggior parte va persa, generalmente sotto forma di calore di dispersione. La quantità di energia perduta risulta essere un buon indicatore dell'efficienza del processo. Alcuni produttori cercano di ridurre i consumi utilizzando forni con sistema di recupero del calore e in grado di funzionare a temperature inferiori (es. vetro cellulare) e forni che operano a ciclo continuo (es. argilla espansa). La distribuzione dei semilavorati e dei prodotti finiti può comportare ingenti consumi energetici, anche superiori a quelli relativi alla fase di produzione.

ISOLANTI SINTETICI:

il processo produttivo, pur essendo lungo e complesso, non comporta dispendi energetici così elevati.

ISOLANTI MINERALI:

consumo molto elevato dovuto ai processi termici di produzione.

Può essere elevato il consumo dovuto alla distribuzione del prodotto finito, a seconda di dove si trova l'impianto di produzione.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

Basso consumo di energia. Si evidenziano però differenze nel processo produttivo. Da segnalare è il consumo di energia per i materiali che subiscono i trattamenti termici: maggiore per la fibra di legno mineralizzata con magnesite e per il sughero espanso in pannelli (350-450°C), minore per i pannelli realizzati mediante termofissaggio con fibra sintetica (fibra di cellulosa, canapa, kenaf, mais) o compressione a caldo e asciugatura (Fibra di legno e sughero compresso) a 160-180°C. Inoltre i pannelli in fibra di legno mineralizzata hanno un consumo rilevante determinato dalla realizzazione del legante (magnesite o cemento Portland); lo stesso vale per la fibra di legno impermeabilizzata con bitume, sostanza di derivazione petrolchimica.

➤ **Inquinamento.**

Si tratta di un fattore di rischio largamente riconosciuto, legato in maniera inscindibile a ogni produzione industriale. In particolare, si possono evidenziare i seguenti effetti:

- **Riduzione della fascia di ozono:** lo strato di ozono è situato nella stratosfera, 15-35 km sopra la superficie terrestre. Esso protegge la Terra dalle radiazioni solari ultraviolette a onde corte (UV-B); un eccesso di radiazioni può determinare gravi danni agli ecosistemi e alla salute dell'uomo (tumori alla pelle, cataratte del cristallino, indebolimento del sistema immunitario).

Lo strato di ozono si forma e si decompone senza sosta, in quanto la luce ultravioletta del sole colpisce le molecole di ossigeno (O_2) trasformandole in ozono (O_3) e viceversa; di norma il tenore di ozono rimane costante, poiché i due processi si annullano a vicenda. L'ozono può però essere ricondotto più rapidamente allo stato di ossigeno tramite sostanze altamente reattive immesse nell'atmosfera: in particolare i gas CFC, HCFC e HFC, utilizzati per l'espansione di alcuni materiali isolanti.

Nel 1995 l'Unione europea ha vietato l'uso e la produzione dei CFC; a questi si sono sostituiti gli HCFC, il cui potenziale di riduzione dell'ozono è stimato pari al 5-20% in meno di quello dei CFC (comunque ancora molto elevato). Anche gli HCFC sono oggetto di divieto dal 2000. Alcuni produttori hanno introdotto l'utilizzo degli HFC, che hanno un contenuto di cloro sufficientemente basso da non essere dannoso per la fascia di ozono, ma un impatto sull'effetto serra molto alto (3000 volte superiore a quello dell'anidride carbonica):

ISOLANTI SINTETICI:

impatto molto elevato per i materiali espansi; per il polistirene espanso estruso, il poliuretano e il polietilene espanso vengono utilizzati HCFC o altri agenti espandenti, come pentano (idrocarburo ottenuto dalla raffinazione della nafta), agenti contenenti azoto (causa incremento dello smog fotochimico), CO_2 . Per il polistirene espanso sinterizzato usano pentano o CO_2 . I gas CFC, HCFC e HFC utilizzati per l'espansione continuano a essere emessi nell'atmosfera anche dal materiale installato.

- **Effetto serra:** il fenomeno dell'effetto serra è sempre esistito. I gas serra che si producono spontaneamente, come l'anidride carbonica (CO_2), il vapore acqueo, il metano (CH_4), il protossido di azoto (N_2O), consentono all'energia a onde corte emessa dal sole di attraversarli, ma trattengono le radiazioni infrarosse a onde lunghe riflesse dalla superficie terrestre; essi hanno consentito di mantenere la temperatura terrestre entro valori adatti allo sviluppo della vita sulla Terra.

L'aggiungersi dei gas serra di origine antropica, prodotti cioè dalle attività umane, ha alterato l'equilibrio naturale del pianeta; in particolare responsabili dell'effetto serra risultano l'anidride carbonica, aumentata rapidamente a causa della combustione di combustibili fossili e della deforestazione, i clorofluorocarburi (CFC) e gas ad essi correlati (HCFC e HFC).

ISOLANTI SINTETICI:

L'elevato impatto dei materiali espansi è dovuto principalmente all'utilizzo di HCFC e HFC come agenti espandenti; dunque non riguarda la fibra di poliestere. È inoltre dovuto, in misura meno rilevante, alle emissioni generate dai processi termici per la trasformazione del petrolio e dei diversi idrocarburi.

ISOLANTI MINERALI:

Il loro impatto è invece determinato fondamentalmente dai processi termici per lavorazione dei minerali, perché i processi produttivi ottenuti dalla combustione dei combustibili fossili in forni per la fusione e l'espansione della materia prima incidono sull'aumento delle emissioni di CO₂ nell'atmosfera.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

Il loro *impatto è irrilevante*. Per i pannelli in fibra di legno mineralizzata va segnalato l'impatto determinato dalla realizzazione del legante (magnesite o cemento Portland); l'industria del cemento ha in particolare un impatto elevatissimo, pari all'8-10% di quello totale.

Per i pannelli in fibra di legno si segnala l'impatto dovuto al bitume (sostanza di derivazione petrolchimica) come impermeabilizzante.

- **Acidificazione:** anche il fenomeno delle piogge acide è naturale ed essenziale: l'anidride solforosa (SO₂) reagisce con l'acqua contenuta nelle nuvole formando acido solforoso (H₂SO₃), che rende acida la pioggia. Le attività antropiche, e in particolare la combustione di combustibili fossili, hanno aumentato enormemente le emissioni di anidride solforosa (SO₂) e vari composti contenenti zolfo e azoto; questo ha determinato l'abbassamento del pH di laghi, foreste, suoli agricoli, con gravi conseguenze per gli organismi viventi.

- **Formazione di smog fotochimico:** la principale causa della formazione di smog fotochimico, le fitte nebbie tossiche presenti nelle aree urbanizzate, è la presenza di ozono nei bassi strati dell'atmosfera; benché nella stratosfera l'ozono protegga la vita, a livello del suolo è estremamente dannoso per la salute dell'uomo. A bassa quota l'ozono si forma grazie all'azione della radiazione solare sugli idrocarburi incombusti combinati con gli ossidi di azoto generati dalla combustione dei combustibili fossili (scarichi dei veicoli a motore, scarichi industriali).

ISOLANTI SINTETICI:

Impatto molto elevato. L'Industria petrolchimica è responsabile della maggior quantità di emissioni di anidride solforosa e composti azotati.

ISOLANTI MINERALI:

Hanno impatto molto elevato i materiali ottenuti dal processo di fusione ad alta temperatura della materia prima (vetro cellulare, lane minerali); minore quello relativo ai materiali granulari espansi. Da segnalare l'impatto dell'isolante in calce-cemento cellulare (la produzione di cemento genera l'emissione di elevate quantità di anidride solforosa e protossido di azoto).

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

modesto l'impatto dei pannelli in fibra di legno impermeabilizzati con bitume e dei pannelli in fibra di legno mineralizzata con cemento Portland e in misura minore con magnesite (per i quali è però significativo l'impatto determinato dalla realizzazione del legante). Gli altri materiali non presentano impatto significativo.

➤ *Insorgenza di disturbi negli addetti alla produzione.*

È un aspetto importante ma spesso trascurato, perché poco si viene a sapere di ciò che avviene durante le fasi di trasformazione delle materie prime e del loro trasporto.

L'esposizione a sostanze tossiche per gli addetti alla produzione si può notevolmente ridurre con l'introduzione di tecnologie avanzate, regolamenti di sicurezza e severe normative tese a proteggere la salute dei lavoratori. Questo avviene però generalmente solo nei paesi industrializzati; nei paesi emergenti, dove sono state trasferite molte produzioni, c'è una minore regolamentazione e i controlli sono meno efficaci.

ISOLANTI SINTETICI:

Il processo produttivo è estremamente lungo e complesso e consiste nella lavorazione di sostanze altamente tossiche. Comporta rischio di incendi ed esplosioni a causa delle sostanze altamente infiammabili e pericolo di insorgenza di disturbi (malattie della pelle, disturbi del sistema nervoso, epatotossicità, tumori) per gli addetti negli stabilimenti, dovuti a contatto o a inalazione delle sostanze altamente tossiche coinvolte nella produzione come stirolo, benzene, isocianati, fosgene, fenoli. Questo in particolare per la produzione dei materiali espansi e, in misura minore, per la fibra di poliestere.

Un altro aspetto problematico è il trasporto di queste sostanze ai luoghi di trasformazione: lo stirolo allo stato liquido e le miscele da espandere vengono immagazzinate in taniche e serbatoi e trasportate in cisterne su strada o su rotaia.

ISOLANTI MINERALI:

l'impatto più elevato è quello legato alla produzione delle lane minerali, che presentano il problema del rilascio di polveri di fibra inalabili dagli addetti alla lavorazione..

La manipolazione delle fibre in fase produttiva è tutelata nei paesi occidentali da disposizioni per la sicurezza negli ambienti di lavoro. Di lieve entità è l'impatto relativo all'escavazione e alla produzione dei materiali granulari: l'emissione di polveri fini che può verificarsi risulta meno problematica rispetto alle lane minerali, in quanto sono polveri a struttura non fibrosa.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

in genere non presentano situazioni particolarmente problematiche.

Può verificarsi il sollevamento di polveri e fibre fini, in particolare per legno, cellulosa, canapa, lino, lana di pecora, cocco e juta, ma è un problema di limitata entità.

2.7.3 Lavorazioni e messa in opera

Nocività per maneggiamento o inalazione.

Bisogna prestare molta attenzione a questa fase. Alcuni materiali isolanti, infatti, necessitano di speciali operazioni di messa in opera che possono richiedere l'utilizzo di sostanze pericolose per l'ambiente e per la salute degli addetti (collanti, additivi ecc.). I responsabili della posa devono curare con la massima attenzione la prevenzione legata alla salute propria e degli utenti: leggere accuratamente le istruzioni relative alle modalità di applicazione, fare uso di guanti e mascherine protettive, favorire la ventilazione durante la manipolazione, il taglio e la lavorazione degli elementi, areare bene e a lungo gli ambienti anche al termine della posa.

ISOLANTI SINTETICI:

La fase di posa non comporta rischi di carattere sanitario, a condizione che non vengano effettuati trattamenti a caldo, poiché l'elevata temperatura alla quale si sottopone il materiale può provocare lo sprigionamento di stirolo e altri prodotti di scomposizione (taglio con filo a caldo, trattamenti con fiamma). Fortemente nociva è l'applicazione di schiume poliuretatiche; vengono emessi isocianati liberi durante l'espansione in sito e nell'arco di alcune ore successive.

Questo può causare irritazione alle mucose e problemi alle vie respiratorie.

ISOLANTI MINERALI:

L'inalazione di microfibre cancerogene dovute alla manipolazione delle lane minerali può avvenire anche nella fase di messa in opera; anche se le esposizioni sono di molto inferiori rispetto ai luoghi di produzione, non sono da sottovalutare. Inoltre l'azione meccanica delle polveri di fibra (non cancerogene perché di maggior spessore) può

causare irritazione a pelle e mucose. Per questo è necessario maneggiare il materiale protetti da guanti, mascherina e occhiali protettivi.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

Non si evidenziano aspetti di particolare pericolosità. Nondimeno è da segnalare il possibile sollevamento di polveri e fibre fini durante la messa in opera di materiali sfusi (fiocchi di cellulosa, lino, lana di pecora e legno mineralizzato) e nel taglio di pannelli e materassini (legno, cellulosa, canapa, kenaf, lino, lana di pecora, cocco e juta). I pannelli applicati con collanti possono rilasciare sostanze tossiche (sughero, fibra di legno).

Inoltre, per alcuni materiali non è da escludere la presenza di residui di insetticidi e antiparassitari utilizzati in coltivazioni e allevamenti intensivi (lino, canapa, lana di pecora), di trattamenti preservanti per proteggere il materiale nei lunghi trasporti (cocco e juta).

2.7.4 Esercizio

Emissioni nocive. La questione riguardante l'emissione di sostanze tossiche, a breve o a lungo termine, durante la fase di vita utile del materiale all'interno dell'involucro edilizio è molto problematica.

ISOLANTI SINTETICI:

Per quanto riguarda i materiali espansi, nei primi mesi successivi alla posa possono venir rilasciati nell'ambiente interno composti organici; in seguito i valori scendono a un livello contenuto, tale da non causare danno alla salute.

Per tutti i sintetici è necessario ricordare il pericolo, in caso di incendio, di emissioni altamente tossiche (monossido e biossido di carbonio, stirolo, benzene, fenoli, acido cianidrico, isocianati, fumi densi e opachi).

ISOLANTI MINERALI:

Le lane minerali vengono realizzate utilizzando collanti e resine fenoliche o melamminiche che possono rilasciare fenolo e formaldeide negli ambienti se applicate in interno; le emissioni sono di minore entità ma comunque rilevanti se applicate in intercapedine. La presenza di formaldeide è più accentuata quanto più la lana si presenta di colore giallo.

Il vetro cellulare, l'isolante in calce-cemento cellulare applicati a secco e i materiali granulari non trattati o additivati non presentano problemi durante la fase di esercizio. Problemi potrebbero insorgere per i materiali granulari bitumati e i pannelli di vetro cellulare incollati con bitume, che se applicati in ambiente interno potrebbero rilasciare sostanze tossiche (come il benzopirene, potenzialmente cancerogeno).

Tutti i materiali di origine minerale, inoltre, possono essere caratterizzati da una modesta radioattività naturale, dovuta al loro contenuto variabile di radon e di altri

elementi radioattivi.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

i pannelli bitumati o applicati con collanti in ambienti interni possono rilasciare sostanze tossiche (sughero, fibra di legno) anche nella fase di esercizio.

2.7.5 Dismissione

➤ ***Perdita di risorse naturali parziale o totale.***

Alla fine della vita utile del materiale si presentano quattro possibilità:

- 1) Il riutilizzo;
- 2) Il recupero;
- 3) Il riciclaggio;
- 4) L'eliminazione.

Le prime due possibilità non causano perdita di risorse; il riciclaggio può causare una parziale perdita di risorse; l'eliminazione ne determina una perdita totale (è anche vero, però, che se un materiale si biodegrada si trasforma in compost e torna alla terra; in questo caso torna a essere una risorsa). Entrando più nel dettaglio, è possibile distinguere:

- 1) ***Riutilizzo***: il materiale, se integro e intatto, viene reimpiegato per lo stesso scopo dopo un trattamento di pulizia;
- 2) ***Recupero***: il materiale, integro e intatto, viene impiegato per uno scopo diverso; anche in questo caso, senza subire particolari trattamenti se non quello della pulizia. Materiali applicati mediante incollaggio non possono essere smontati senza danneggiamento, dunque non possono essere riutilizzati e recuperati; lo stesso vale per i materiali granulari impastati con leganti. In generale l'elevato costo della manodopera rende antieconomico il riutilizzo e il recupero, se non per componenti studiati allo scopo;
- 3) ***Riciclaggio***: il materiale viene reinserito nel ciclo produttivo come nuova materia prima; lo stesso può avvenire per i cascami della produzione. Per poter essere riciclati, i materiali edili devono subire pretrattamenti più o meno complessi, che vanno dalla semplice frantumazione dei materiali minerali al trattamento chimico-fisico per i materiali plastici, con conseguente consumo di energia.

Nell'edilizia la quota di riciclaggio è solo del 40% circa, poiché l'eterogeneità dei componenti rende estremamente difficile la separazione e la rielaborazione dei materiali;

- 4) ***Eliminazione***: i materiali biodegradabili, totalmente vegetali o animali, possono essere convogliati ai siti di compostaggio dove avviene la decomposizione a opera di microrganismi presenti in natura e la reintegrazione della materia prima nell'eco sistema; altrimenti possono venir bruciati. I materiali non biodegradabili di origine totalmente minerale

possono essere depositati in discariche ordinarie o per scarti di materiali da costruzione; quelli di origine sintetica, la cui biodegradabilità richiede tempi estremamente lunghi, devono essere smaltiti come rifiuti speciali o inviati all'incenerimento, processo fortemente problematico per l'inquinamento che genera. I materiali misti, che accoppiano vegetale-sintetico o minerale-sintetico al fine di migliorare alcune prestazioni e che trovano oggi ampia diffusione, sono e saranno difficilmente smaltibili poiché non si potranno compostare né convogliare in centri di riciclaggio per materiali sintetici; la combustione per recupero di energia è problematica per la presenza della fibra sintetica.

➤ ***Consumo di energia.***

La fase di dismissione può comportare un considerevole dispendio di energia, utilizzata per la maggior parte nei processi di riciclaggio, e in misura minore per il funzionamento dei macchinari adibiti al prelevamento e deposito in discarica dei materiali.

➤ ***Inquinamento.***

La fase di dismissione, e in particolare quella del riciclaggio, possono essere causa di inquinamento anche significativo. Riciclare un prodotto, infatti, non significa necessariamente ottenere materiali a basso impatto ambientale, in particolare per quanto riguarda i materiali plastici.

In questi anni si è praticata soprattutto la strada del cosiddetto "riciclaggio termico", ossia la combustione dei rifiuti plastici negli inceneritori per produrre energia termica. Questa soluzione presenta però alcune controindicazioni:

- la plastica non viene valorizzata come importante fonte di carbonio;
- il potere calorifico del materiale viene così utilizzato una sola volta, come avviene per il petrolio, e tutta l'energia impiegata nella fabbricazione del prodotto finale va così perduta;
- la combustione delle materie plastiche genera emissioni fortemente inquinanti.

È possibile lavorare nuovamente le materie plastiche per ottenere nuovi prodotti d'alto valore, cosa però ancora poco realizzata nel concreto.

Un esempio è la lavorazione delle bottiglie in plastica post consumo dalla quale si ottengono, scaglie in PET⁴ di elevata qualità che vengono utilizzate, in alternativa al polimero vergine, per la produzione di pannelli in fibra di poliestere. Si dovrebbe comunque considerare che il possibile riutilizzo prima - e il riciclaggio poi - terminano inevitabilmente, dopo un numero definito di cicli energetici, con la produzione di rifiuti, quale ultimo passaggio del processo di degradazione e perdita di qualità dell'energia. Inoltre il principio del riciclaggio presuppone

⁴ PET: è l'acronimo di Polietilene Tereftalato o polietilentereftalato, una resina termoplastica appartenente alla famiglia dei poliesteri, composta da ftalati.

l'esistenza e la disponibilità di rifiuti; divenendo un vero e proprio business, può portare alla giustificazione di una sempre maggior produzione di rifiuti e di un consumo inconsapevole di risorse preziose.

Un aspetto importante da considerare è la durata di vita del materiale: una scarsa durabilità comporta, oltre alla perdita di prestazione del materiale, la necessità di manutenzione e l'eventuale sostituzione dello stesso; un materiale ad elevata durabilità, oltre a mantenere inalterato nel tempo il proprio comportamento prestazionale, permette di ridurre la presenza di rifiuti da smaltire.

➤ *Degrado del territorio.*

La creazione di discariche e di impianti di incenerimento deturpa fortemente il territorio e sarà sempre più difficile trovare aree da adibire a tali funzioni.

ISOLANTI SINTETICI:

Se correttamente applicati, possono avere una durata di vita che va dai 30 ai 50 anni. Il riutilizzo è possibile se il materiale non è accoppiato, incollato o sporco.

La fibra di poliestere, in buona parte già proveniente da poliestere riciclato, è riciclabile al 100%.

ISOLANTI MINERALI:

Il maggior impatto è quello relativo alle lane minerali. Il riutilizzo è teoricamente possibile, a condizione che il materiale sia in buono stato di conservazione (non imbrattato, danneggiato, impregnato di umidità); di fatto viene poco praticato poiché quasi tutte le lane minerali prodotte prima del 1995 sono fortemente sospette di essere cancerogene. Questo rende difficile anche il riciclaggio; alcuni produttori (in Svizzera) reinseriscono il materiale smontato nel ciclo produttivo. Le lane minerali non sono compostabili né combustibili; possono solo essere depositate in discarica.

ISOLANTI VEGETALI E ANIMALI:

Da segnalare l'impatto relativo ai pannelli di fibra di legno mineralizzata, poiché la presenza del legante rende impossibile la combustione per recupero di energia e difficile la riciclabilità; una forma possibile di riciclo è l'utilizzo come inerte per calcestruzzo dopo frantumazione.

Problematici sono i materiali trattati con bitume o applicati mediante colle e adesivi (sughero, fibra di legno). Rilevante il problema dei materiali misti realizzati mediante aggiunta di fibra sintetica, perché non sono compostabili e devono essere bruciati (inquinamento dovuto alla combustione della componente sintetica, seppur in poca quantità) o portati in apposita discarica.

I trattamenti ignifuganti e antiparassitari (sali di boro, soda, sostanze a base di urea per la lana di pecora) rendono critico il compostaggio e lo smaltimento in discarica per le conseguenti lisciviazioni nel terreno.

2.8 Gli isolanti a base di legno

Il legno è un materiale naturale rinnovabile ideale per la realizzazione di isolanti per molteplici ragioni: pratiche, economiche o ecologiche. Se gestita adeguatamente, la risorsa è inesauribile. Nel corso della sua crescita, un albero assorbe, in media, circa 1 tonnellata di CO₂, producendo nel contempo 1 tonnellata di ossigeno molecolare O₂⁵.

Attraverso la fotosintesi (Vedi paragrafo 7.1 Approfondimenti), l'anidride carbonica (CO₂) dell'aria e l'acqua si trasformano in ossigeno (O₂), acqua e glucosio (un carboidrato), il carbonio (C) assorbito durante la fotosintesi è immagazzinato all'interno e viene nuovamente rilasciato con la fase di respirazione notturna e in caso di combustione.

Ovviamente, lo sfruttamento delle risorse non deve essere effettuato senza un piano preciso. Al fine di lottare contro la deforestazione, occorre privilegiare gli isolanti la cui materia prima provenga da foreste gestite in modo consapevole che garantiscano la loro durata nel tempo. Si tratta di prodotti dotati di marchio FSC⁶ o PEFC⁷.

Allo stesso modo, è utile preferire prodotti derivanti da operazioni di sfoltimento o da scarti di segheria non trattati. Tali caratteristiche devono essere specificate dai produttori sulle etichette o nelle schede descrittive dei prodotti.

È possibile fabbricare diverse tipologie di isolanti con il legno come i pannelli in fibra di legno ad alta densità, i pannelli in fibra di legno a bassa densità, la fibra di legno-cemento, chiamata anche "lana di legno", le fibre sfuse o i granulati.

⁵ Secondo Legge regionale 28 maggio 2007 n. 13 sulla Certificazione energetica in Piemonte, si assume che 1 ha di bosco è in grado di smaltire annualmente 100 tonnellate di CO₂

⁶ **FSC (Forest Stewardship Council)** è uno schema di certificazione in grado di garantire al consumatore che il prodotto è realizzato con materiale proveniente da foreste gestite correttamente dal punto di vista ambientale, sociale ed economico. Si sviluppa su due livelli: Certificazione Forestale e Certificazione della Catena di Custodia. Il simbolo assicura il consumatore finale che il legno utilizzato nella fabbricazione del prodotto risponde ad elevati standard di salvaguardia delle caratteristiche ambientali, sociali ed economici delle foreste

⁷ **PEFC (Programme for Endorsement of Forest Certification schemes)** è un programma di riconoscimento degli schemi di certificazione forestale nazionali. Si basa su una larga intesa delle parti interessate all'implementazione della gestione forestale sostenibile a livello nazionale e regionale: proprietari forestali, consumatori finali, utilizzatori, liberi professionisti. E' possibile certificare PEFC sia la foresta/piantagione, che il prodotto finito, grazie all'azione su due livelli: Certificazione Forestale e Certificazione della Catena di Custodia. Il PEFC è stato sviluppato nel 1998 dai proprietari forestali e dell'industria del legno europei per facilitare il mutuo riconoscimento degli schemi di certificazione forestali nazionali già esistenti.

2.8.1 Gli isolanti in fibra di legno

Si presentano sotto forma di pannelli rigidi di diversa densità. I lati di questi ultimi possono presentare scanalature per l'incastro dei giunti o essere lisci. Vengono commercializzati anche pannelli a bassa densità o "lane di legno" e pannelli con giunti a battuta dotati di trattamento idrofugo a base di lattice.



Fig. 2.3 *Isolante in fibra di legno*

- **Materia Prima:**

I pannelli di fibra di legno vengono prodotti attraverso la lavorazione di legname di scarto proveniente da segherie, da silvicoltura sostenibile e dalla ripulitura di boschi. La materia prima è rigenerabile e disponibile in misura praticamente illimitata. Le principali specie generalmente utilizzate sono quelle resinose, come abeti, abeti rossi, larici o pini. Queste vengono apprezzate per la qualità delle loro fibre.

La produzione dei pannelli comporta un consumo di energia relativamente basso e l'inquinamento ambientale per effetto delle acque di scarico (lo zucchero che risulta dall'idrolisi consuma grandi quantità di ossigeno presente nell'acqua) viene ridotto al minimo attraverso la circolazione in circuiti chiusi.

- **Produzione:**

La coesione del prodotto, durante la fabbricazione con processo *a umido*, viene ottenuta grazie alla lignite del legno.

Vengono privilegiati gli sfridi di lavorazione delle segherie. Tutti questi residui vengono tritati, essiccati con l'apporto di vapore acqueo sotto pressione, poi sfibrati. Le fibre ottenute vengono miscelate ad acqua calda (4-5%), emulsioni idrorepellenti (paraffina 0,5-1,5%) e solfato di alluminio (0,5-2%) che oltre a essere antitarmico e antiparassitario, attiva le proprietà leganti della resina naturale propria del legno (lignina), senza che sia necessaria l'aggiunta di ulteriori leganti. Vengono mescolate all'interno di vasche, pressate meccanicamente, poi tagliate in pannelli. I pannelli in fibra di legno ancora morbidi passano all'interno di essiccatoi, la cui temperatura è compresa tra 160 e 200°C. Non sono effettuate

aggiunte di colla; tuttavia, per alcune applicazioni specifiche, può essere necessario aggiungere dei sottoprodotti come bitume o resine. I pannelli ottenuti dalla catena produttiva hanno uno spessore compreso tra 8 e 30 mm. Per fabbricare elementi più spessi, occorre incollare tra loro più strati per mezzo di una colla da legno.

Esiste un altro metodo di fabbricazione, quello *a secco*. Esso consiste nell'aggiungere alle fibre ridotte quantità di leganti, come della resina di poliuretano (contenuto di formaldeide inferiore al 6%). Il legno viene sminuzzato in placchette e sfibrato con un trattamento termo meccanico. Le fibre vengono incollate ed essiccate. La miscela viene pressata, raffreddata e lavorata fino ad ottenere il formato desiderato. Si ottengono pannelli che, pur avendo bassa densità, presentano elevata resistenza alla compressione e all'umidità.

Per la fabbricazione di pannelli a bassa densità, le fibre del materassino vengono termolegate con fibre poliolefiniche e trattate con del fosfato di ammonio (Sali acidi di minerali azotati) contro gli incendi. Esistono anche isolanti completamente naturali per i quali non viene fatto ricorso ad additivi petrolchimici, i cui leganti sono costituiti da fibre tessili estratte dal mais.

Le fibre di legno vengono commercializzate anche sfuse per la posa in opera con insufflazione. Esse sono trattate con fosfato di ammonio e acido borico.

I pannelli ad alta densità vengono destinati spesso alla coibentazione di coperture per le loro qualità di sfasamento termico. Per migliorare la resistenza alla pioggia dei pannelli possono essere trattati con materiale idrofugo (10%) come il lattice, il silicato, paraffina o bitume. Contro le muffe, può essere impiegato del solfato di alluminio.

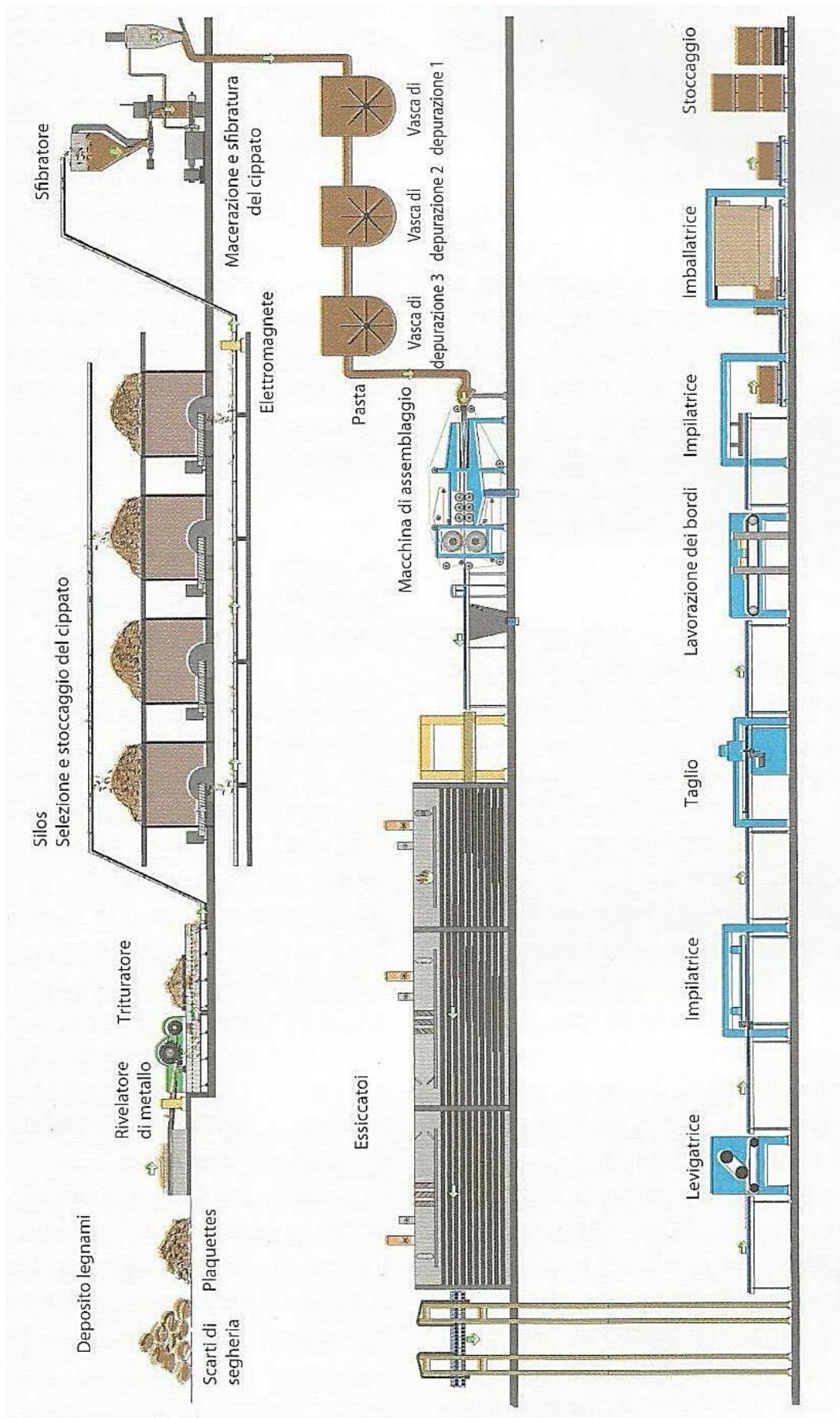


Fig. 2.4 *La fabbricazione dei pannelli in fibra di legno*

- **Caratteristiche:**

La massa volumica dei pannelli in fibra di legno è compresa tra 110 e 250 [kg/m³] ed è pari a 50 [kg/m³] per quelli a bassa densità.

Gli isolanti a base di fibra di legno ad alta densità sono ottimi dal punto di vista dello sfasamento e smorzamento dell'onda termica, permettono dunque di ottenere involucri con ottima inerzia termica. Vengono apprezzati per la loro capacità di migliorare notevolmente il comfort durante l'estate, particolare se utilizzati per le coperture. I pannelli in fibra di legno ad alta densità e elevato spessore ritardano l'entrata del calore nell'abitazione offrendo uno sfasamento che può superare le 12 ore, valore ottimale per il comfort estivo.

Gli isolanti a base di fibra di legno non presentano rischi per la salute.

Tuttavia, è consigliabile verificare gli additivi presenti nella loro composizione; i pannelli al bitume, ad esempio, possono provocare emissioni di VOC⁸ se esposti al calore su una copertura.

La conduttività termica è compresa tra 0,038 e 0,049 [W/(m*k)] per i pannelli. È pari a 0,038 [W/(m*k)] per la fibra di legno bassa densità e a 0,040 [W/(m*k)] per le fibre sfuse. Come per ogni altra tipologia isolante, i prodotti utilizzati devono essere dotati di certificazione.

I pannelli, durante il processo di fabbricazione, subiscono un trattamento ignifugo. In caso di incendio, quando l'isolante viene attaccato dalle fiamme, si forma superficialmente uno strato di legno carbonizzato che impedisce l'apporto di ossigeno e la propagazione rapida del fuoco. Non vi è emissione di fumi tossici. I pannelli presentano una euroclasse di reazione al fuoco "E" e sono in grado di resistere alle fiamme e di limitarne la propagazione per un attacco di breve durata. Come la maggior parte degli isolanti vegetali, se applicati dall'interno devono essere protetti con materiali non infiammabili, generalmente in lastre di gessofibra.

I pannelli in fibra di legno possono essere impiegati nell'isolamento termo-acustico date le loro ottime prestazioni complessive. Assorbono sia i rumori aerei che quelli da impatto, coprendo un'ampia fascia dello spettro delle frequenze.

Gli isolanti a base di fibre di legno sono igroscopici: sono in grado di diffondere molto bene il vapore acqueo e possono immagazzinare umidità. Permettono dunque la regolazione dell'umidità all'interno dell'abitazione. Se la posa viene correttamente progettata ed eseguita e sono evitati i fenomeni di condensa interstiziale, questi prodotti contribuiscono a mantenere un'ottima qualità dell'aria ambiente. In questo ambito, i pannelli a bassa densità si rivelano lievemente migliori rispetto a quelli ad elevata

⁸ VOC: acronimo di Volatile Organic Compound – Composto Organico Volatile.

densità. In ogni caso si deve effettuare una verifica termoigrometrica (Metodo di Glaser – vedi paragrafo 7.2) per determinare la possibilità di formazione di condensa interstiziale, che si può correggere, a seguito di seconda verifica, con uno strato di freno al vapore.

È sempre consigliabile realizzare involucri a pori aperti ad alta permeabilità al vapore, detti comunemente "traspiranti". Occorre sempre proteggere l'isolante dal contatto diretto con acqua.

Con posa dall'esterno, laddove necessario (es. manti di copertura e facciate ventilate), si possono integrare le protezioni da infiltrazione di acqua con la posa di teli sottotetto, ovvero teli permeabili al vapore e impermeabili all'acqua.

Il prezzo è accessibile e la scelta vasta, numerosi produttori propongono un'ampia offerta di articoli.

Caratteristiche tecniche Pannelli in Fibra di Legno			
		Pannelli flessibili	Pannelli rigidi
Massa volumica (ρ)	Kg/m ³	45-55	150-300
Conduktività termica (λ)	W/mK	0,038	0,038-0,052
Calore specifico (c)	kJ/kgK	2,10	
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore (μ)	-	1-2	5-10
Resistenza a compressione	Kg/m ²	0,13*10 ⁴ -3,96*10 ⁴	
Reazione al fuoco	-	Classe 2	
Sviluppo fumi al caso di incendio	-	(1)	
Indice di attenuazione del rumore di calpestio (ΔL_w)	dB	18-26 (a seconda dello spessore)	
Coefficiente di assorbimento acustico (α)	-	-	
Assorbimento d'acqua per immersione	(2)	Dopo 2 ore < 25-30%	
Assorbimento d'acqua per diffusione	(2)	Umidità relativa del 30%: 1,6% vol Umidità relativa del 60%: 2,5% vol Umidità relativa del 90%: 4,2% vol	

(1) In caso di incendio si formano i normali gas di combustione.

(2) L'unità di misura dipende dalle modalità e dalle procedure di prova effettuate.

Durabilità Pannelli in Fibra di Legno	
Resistenza agli agenti chimici	-
Resistenza agli agenti biologici	-
Stabilità all'invecchiamento	-

- **Utilizzo:**

La fibra di legno viene utilizzata all'interno dell'edificio per l'isolamento termico di solette o solai con differenti tipi di posa, tra questi ricordiamo la posa a pavimento con controstruttura per il piano di calpestio (su travetti), la posa intertrave nei solai in legno, la posa a pavimento nei solai dei sottotetti non agibili, o in controsoffittatura.

A pavimento si posano anche i materassini anticalpestio ad alta densità (h = 2 cm circa).

Nella coibentazione delle coperture a falde si interpongono i pannelli fra i puntoni e gli arcarecci oppure si effettuano le soluzioni di posa dall'esterno su tavolato.

Ottima la soluzione di tetto ventilato con posa di pannelli in fibra di legno posati tra strati di pannelli in fibra di legno-cemento, posati in falda sul lato esterno del tavolato, il tutto protetto da tela sottotetto. Tra il tavolato e i pannelli viene interposto un ulteriore tela permeabile al vapore ma impermeabile all'acqua come antipolvere e antivento o come freno al vapore.

La fibra di legno è il materiale ideale per la coibentazione degli edifici con struttura in legno e per applicazioni di isolamento termoacustico all'interno degli ambienti abitativi, per l'isolamento dei muri perimetrali, delle pareti divisorie, solai e soprattutto in coperture lignee per gli aspetti di comfort estivo legato allo sfasamento e smorzamento dell'onda termica.

I pannelli in fibra di legno ad alta densità vengono utilizzati all'esterno per l'isolamento di coperture a falde o per l'isolamento a cappotto (o finiti con intonaco di calce idraulica per alcuni prodotti). Per le facciate ventilate vengono utilizzati pannelli sia a bassa densità sia ad alta densità.

Le fibre in legno sfuse sono destinate al riempimento di cavità chiuse, posate con insufflaggio all'interno delle intercapedini verticali o orizzontali o a pavimento per solai non agibili. A ragione della sua eco-compatibilità, trova ampia applicazione nella bioedilizia.

Applicazioni tipiche:

	Isolamento dall'interno	Isolamento dall'esterno	Isolamento intercapedine	Cassero a perdere
Parete perimetrale	X		X	
Parete interna	X		X	
Parete controterra	X			
Copertura piana ispezionabile				
Copertura piana pedonabile				
Copertura piana carrabile				
Copertura piana giardino				
Copertura a falda struttura continua		X		
Copertura a falda struttura discontinua		X		
Solaio sottotetto		X		
Solaio su vespaio aerato				
Solaio su ambiente non riscaldato				
Solaio controterra				
Impianti (tubazioni, caldaie...)				
Cassonetti di finestre				

Fig. 2.5 Applicazioni tipiche per Pannelli in Fibra di Legno

Fonte: A.N.I.T. Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico ed Acustico

- **Smaltimento:**

I pannelli sono riutilizzabili e riciclabili come combustibile (i pannelli bitumati non vanno assolutamente utilizzati come combustibile per riscaldare). I resti dei pannelli possono essere lavorati per produrre nuovi materiali isolanti, sono compostabili e biodegradabili.

- **Consumo di Energia primaria MJ/kg:**

Approvvigionamento materie prime	2,61
Trasporto materie prime	0,45
Processo produttivo	12,90
Imballaggio	0,04
Consumo Totale	17,00

Fonte: L'isolamento ecoefficiente

2.8.2 Gli isolanti in Fibra di Legno Mineralizzata

I prodotti in fibra di legno mineralizzata presenti sul mercato sono diversi e variano a seconda del tipo di legante e di procedimento produttivo utilizzato. Le fibre di legno, macinate e sfibrate mediante opportuni trattamenti meccanici, vengono impregnate con magnesite oppure con cemento e, in misura minore, con altri leganti minerali per determinare la mineralizzazione, che apporta alle fibre una notevole coesione e compattezza strutturale.



Fig. 2.6 *Isolante in Fibra di legno mineralizzata*

- **Materia prima:**
 - ❖ Per mineralizzazione con *Magnesite*:
Legname di pioppo proveniente da coltivazioni; magnesite MgO (Ossido di Magnesio) estratta da cave.
 - ❖ Per mineralizzazione con *Cemento*:
Legnami di scarto di piccolo diametro (abete, larice, Douglas, rovere) in genere provenienti da segheria (parti del tronco non utilizzabili per gli impieghi normali di falegnameria), sfrondamenti e diradamenti boschivi frutto della manutenzione delle foreste o di coltivazioni di legname da costruzione.
Additivi mineralizzanti: microsilicio e silicato di sodio (fumi di silicio), cemento.
- **Produzione:**
 - ❖ Per mineralizzazione con *Magnesite*:
I ceppi di legno vengono fatti asciugare all'aria per almeno un mese e vengono poi tagliati, macinati e sfibrati mediante opportuni trattamenti meccanici al fine di ottenere fibre da 3 a 5 mm di larghezza e di circa 0,3 mm spessore, cioè la cosiddetta *lana di legno* la quale presenta un ridotto

tasso di umidità. Viene miscelata con magnesite caustica MgO, ottenuta dalla calcinazione di magnesite minerale ad alto contenuto di carbonato di magnesio (in forno rotativo a 800-1000°C di temperatura) e con ossisolfato di magnesio MgSO₄ e acqua (in soluzione). Caratteristica della magnesite è di combinarsi con il solfato di magnesio costituendo un prodotto cristallino di forti proprietà leganti, noto come ossisolfato di magnesio, che impregna, lega e mineralizza le fibre di legno.

L'impasto viene versato in stampi da cui vengono formati i singoli pannelli mediante pressione e alta temperatura (circa 450°C): questo fa sì che la fibra di legno si svuoti dei contenuti organici deperibili e assorba l'ossisolfato di magnesio che la mineralizza, processo che progredisce nel tempo ed è simile alla fossilizzazione che avviene in natura.

I pannelli vengono successivamente essiccati.

La rasatura superficiale dei pannelli pre-intonacati viene incorporata monoliticamente in fase di formatura ed è costituita da un impasto di fibre di legno molto corte e sottili mineralizzate a caldo con ossisolfato di magnesio.

❖ Per mineralizzazione con *Cemento*:

Il legname viene tagliato e sminuzzato in placchette di varie dimensioni (da 1÷35mm circa), poi passato in una macina con setaccio per il controllo della granulometria. I granuli vengono essiccati (350°C) al fine di estrarre tutta l'acqua, poi immersi in un bagno di soluzione mineralizzante alcalina costituita da microsilicio amorfo e silicato di sodio (fumi di silicio). Questo trattamento termico, insieme al processo di mineralizzazione, permette di eliminare le variazioni dimensionali del legno consentendogli di conservare le proprietà di elasticità e di resistenza, in modo cioè da ottenere un prodotto sfuso stabilizzato.

La produzione dei pannelli può avvenire partendo dal materiale sfuso stabilizzato, che viene miscelato con cemento classico da costruzione e acqua, oppure miscelando lunghe fibre ottenute mediante opportuni trattamenti di taglio e sfibratura (in misura del 65%) con leganti minerali, principalmente cemento Portland (35%) e acqua (pannelli tipo Celenit). In entrambi i casi l'impasto viene posto in stampi per 24-48 ore a temperatura ordinaria per formare i singoli pannelli, questi, dopo essere stati sformati ed essiccati in appositi forni, sono pronti dopo 30 giorni di maturazione.

Il legante viene così a rivestire la fibra e questo ne determina la mineralizzazione, che mantiene le proprietà meccaniche del legno ma ne annulla i processi di deterioramento biologico, rendendo le fibre inerti, immarcescibili e resistenti al fuoco.

- **Caratteristiche:**

La densità dei pannelli in fibra di legno cemento è compresa fra 300 e 1.000 [kg/m³].

Offrono una buona inerzia termica, calore specifico attorno ai 2.100 [kJ/(kg*K)], che può essere sfruttata per migliorare il comfort termico dell'edificio.

Il materiale non presenta rischi particolari per la salute o per l'ambiente, sia nel corso del suo ciclo di vita utile sia allo stato di rifiuto (è inerte). Il livello di energia grigia è piuttosto rilevante dato l'uso di prodotti a base di cemento.

La conduttività termica λ è leggermente sopra alla media, compresa fra 0,06 e 0,1 [W/(m*K)], tuttavia pannelli vengono utilizzati per altre loro caratteristiche quali la capacità di sfasamento e smorzamento, la resistenza al fuoco, la rigidità, il potere fonoisolante, soprattutto integrati con altri materiali coibenti. Offrono una buona correzione acustica nei locali con forte riverbero poiché la loro struttura è in grado di assorbire efficacemente i suoni. Vengono posti in classe B rispetto al fuoco nell'ambito delle Euroclassi.

Sono durevoli poiché non aggredibili dai roditori, dagli insetti e dall'umidità.

I pannelli in fibra di legno cemento sono esternamente permeabili al vapore acqueo. Permettono di regolare l'umidità relativa dell'aria.

Possono essere utilizzati come supporto di rivestimento e vengono apprezzati per la loro resistenza alla compressione.

Il prezzo è accessibile. Vengono generalmente impiegati per controsoffitti fonoassorbenti, posa a pavimento, come strato isolante esterno da intonacare, come fondo di casseforme a perdere e soprattutto di coperture a falda.

In particolare, i pannelli mineralizzati con cemento, possono essere inchiodati, tassellati o posati con malta a base di calce. Tali malte vengono alleggerite utilizzando i granulati del processo produttivo per incrementarne le proprietà di isolamento termoacustico.

Questo tipo di malte sono ottenute da una miscela di sabbia, legante, acqua, granulati. In via indicativa, per una malta non strutturale dosata a 300 [kg/m³] di cemento, vengono utilizzati 900 litri di granulati, 300 kg di cemento, 210 litri di sabbia e 180 litri di acqua. La conduttività termica di questo composto dopo l'asciugatura completa è circa 0,20 [W/(m*K)].

Per una malta non strutturale dosata a 400 [kg/m³] di cemento, si impiegano 800 litri di granulati, 400 kg di cemento, 320 litri di sabbia e 220 litri di acqua. La conduttività termica del composto è circa di 0,38 [W/(m*K)].

Si ricorda che gli intonaci cementizi o a base cemento sono caratterizzati

da una scarsa permeabilità al vapore e potrebbero dare luogo alla formazione di muffe sulla superficie interna delle murature perimetrali.

A seconda delle applicazioni, queste malte vengono posate con una rete metallica elettrosaldata o rete sintetica. È possibile creare una protezione contro l'umidità di risalita, soprattutto in caso di pavimentazione su terrapieno, con l'applicazione di un manto bituminoso impermeabile.

Per la produzione di calcestruzzo non strutturale utilizzato per la realizzazione di massetti, vengono impiegati 1.000 litri di granulati, 300 kg di cemento, 160 litri di acqua. La conduttività termica di questo composto è pari a 0,11 [W/(m*K)].

La conduttività termica dei soli granulati è di 0,07 [W/(m*K)].

Nello specifico le Caratteristiche tecniche sono:

❖ Per mineralizzazione con *Magnesite*:

Caratteristiche tecniche Pannelli in Fibra di Legno Mineralizzata con Magnesite		
Massa volumica (ρ)	Kg/m ³	300-625
Conduttività termica (λ)	W/mK	0,086-0,107
Calore specifico (c)	kJ/kgK	1,88
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore (μ)	-	4-10
Resistenza a compressione	Kg/m ²	2,8*10 ⁴ -7,6*10 ⁴
Reazione al fuoco	-	Classe 1
Sviluppo fumi al caso di incendio	-	Non emette fumi e gas tossici (1)
Indice di attenuazione del rumore di calpestio (ΔL_w)	dB	-
Coefficiente di assorbimento acustico (α)	-	Fino a 0,88 (tra 125 e 4000 Hz)
Assorbimento d'acqua per immersione	(2)	-
Assorbimento d'acqua per diffusione	(2)	-

(1) *Sviluppa i fumi propri della combustione del legno.*

(2) *L'unità di misura dipende dalle modalità e dalle procedure di prova effettuate.*

Durabilità Pannelli in Fibra di Legno Mineralizzata con Magnesite	
Resistenza agli agenti chimici	-
Resistenza agli agenti biologici	Inattaccabile da insetti, termiti e roditori (3)
Stabilità all'invecchiamento	Imputrescibile e inalterabile nel tempo (4)

(3) *Certificato del South African B.S. / C.S.I.R.*

(4) *Prove effettuate su parte dell'Università di Monaco su pannelli in opera da 44 anni hanno dimostrato la conservazione delle resistenze meccaniche*

❖ Per mineralizzazione con *Cemento*:

Caratteristiche tecniche Pannelli in Fibra di Legno Mineralizzata con Cemento		
Massa volumica (ρ)	Kg/m ³	360-1000
Conduttività termica (λ)	W/mK	0,006-0,009
Calore specifico (c)	kJ/kgK	1,8-2,1
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore (μ)	-	5-13
Resistenza a compressione	Kg/m ²	2,8*10 ⁴ -9*10 ⁴
Reazione al fuoco	-	Classe 1
Sviluppo fumi al caso di incendio	-	Non emette fumi e gas tossici (1)
Indice di attenuazione del rumore di calpestio (ΔL_w)	dB	22 (s = 25mm)
Coefficiente di assorbimento acustico (α)	-	0,75-0,87 (tra 125 e 4000 Hz)
Assorbimento d'acqua per immersione	(2)	-
Assorbimento d'acqua per diffusione	(2)	2-3,5 lt/m ² (3) (a seconda dello spessore)

(1) *Sviluppa i fumi propri della combustione del legno.*

(2) *L'unità di misura dipende dalle modalità e dalle procedure di prova effettuate.*

(3) *Il cemento conferisce al pannello insensibilità all'acqua, al gelo, all'umidità senza che vi siano rigonfiamenti e sgretolamenti, rendendolo perciò adatto a utilizzi in condizioni severe. I pannelli assorbono l'umidità in eccesso e la rilasciano successivamente (regolatore igrometrico) senza subire deformazioni.*

Durabilità tecniche Pannelli in Fibra di Legno Mineralizzata con Cemento	
Resistenza agli agenti chimici	- (4)
Resistenza agli agenti biologici	Inattaccabile da insetti, termiti e roditori
Stabilità all'invecchiamento	Imputrescibile e inalterabile nel tempo (5)

(4) *L'impregnazione della fibra con sostanze mineralizzanti, unita all'azione dei silicati presenti nel cemento, protegge la fibra in modo definitivo da ogni azione chimica e biologica; ha un comportamento neutro nei riguardi degli altri elementi da costruzione con i quali viene a contatto. Non ha azione corrosiva su materiali plastici, tubazioni e parti metalliche.*

(5) *Il pannello migliora le sue prestazioni nel tempo grazie al processo di carbonatazione della calce presente nel cemento. I silicati di calcio costituenti circa l'80% del cemento reagiscono con l'acqua di impasto, avviene cioè il fenomeno dell'idratazione del cemento. Uno dei prodotti dell'idratazione dei silicati di calcio è appunto la calce (idrossido di calcio $Ca(OH)_2$) che, reagendo con l'anidride carbonica CO_2 presente nell'aria, nel corso del tempo, origina carbonato di calcio $CaCO_3$ (carbonatazione), responsabile della presa e dell'indurimento e, più in generale, del comportamento meccanico di paste, malte e calcestruzzi.*

- **Utilizzo:**

Vengono generalmente impiegati per controsoffitti fonoassorbenti, posa a pavimento, come strato isolante esterno da intonacare, come fondo di casseforme a perdere e soprattutto di coperture a falda.

Applicazioni tipiche:

	isolamento dall'interno	isolamento dall'esterno (*)	isolamento intercapedine	Cassero a perdere
Parete perimetrale	X	X	X	X
Parete interna	X		X	X
Parete controterra	X		X	X
Copertura piana ispezionabile	X	TC		
Copertura piana pedonabile	X	TC		
Copertura piana carrabile	X	TC		
Copertura piana giardino				
Copertura a falda struttura continua	X	X		
Copertura a falda struttura discontinua	X	X		
Solaio sottotetto	X	X		
Solaio su vespaio aerato	X	X		
Solaio su ambiente non riscaldato	X	X		
Solaio controterra	X	X		
Impianti (tubazioni, caldaie...)	X			
Cassonetti di finestre	X			
Ponti termici	X			

(*) TC = tetto caldo

Fig. 2.6 Applicazioni Pannelli in Fibra di Legno Mineralizzata

Fonte: A.N.I.T Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico ed Acustico

- **Smaltimento:**

- ❖ Per mineralizzazione con *Magnesite*:

I pannelli possono essere riutilizzati.

L'irreversibilità della mineralizzazione e l'incombustibilità del materiale rendono impossibile il suo utilizzo per il recupero di energia da combustione e difficile la sua riciclabilità: una forma possibile di recupero è la frantumazione e il riutilizzo come inerte nel calcestruzzo.

- ❖ Per mineralizzazione con *Cemento*:

il prodotto sfuso e i pannelli possono essere riutilizzati. La mineralizzazione rende le fibre di legno biodegradabili in tempi molto lunghi.

L'irreversibilità della mineralizzazione e l'incombustibilità del materiale rendono impossibile il suo utilizzo per il recupero di energia da combustione e difficile la sua riciclabilità: una forma possibile di recupero è la frantumazione e il riutilizzo come inerte nel calcestruzzo.

- **Consumo di energia primaria in MJ/kg:**

- ❖ Per mineralizzazione con *Magnesite*:

Approvvigionamento materie prime	0,80
Trasporto materie prime	0,10
Processo produttivo	1,00
Imballaggio	0,10
Consumo Totale	2,00

- ❖ Per mineralizzazione con *Cemento*:

Approvvigionamento materie prime	2,10
Trasporto materie prime	0,10
Processo produttivo	3,10
Imballaggio	0,10
Consumo Totale	5,40

I granulati ottenuti vengono utilizzati come elementi inerti di alleggerimento in malte leggere isolanti, incrementandone le proprietà di isolamento termoacustico. Le loro prestazioni meccaniche sono in genere sufficienti a effettuare fissaggi per avvitamento o inchiodatura. Questo tipo di malte sono ottenute da una miscela di sabbia, legante, acqua, granulati. In via indicativa, per una malta non strutturale dosata a 300 [kg/m³] di cemento, vengono utilizzati 900 litri di granulati, 300 kg di cemento, 210 litri di sabbia e 180 litri di acqua.

3. IL PELLETT

I “pellets” sono piccoli cilindretti di legno pressato prodotti con gli scarti della lavorazione del legno, come trucioli o segatura, ma anche da puliture di sottobosco di diametro che varia dai 6 ai 10 mm ed una lunghezza che va da 1,5 a 3 cm. Tali scarti sarebbero altrimenti inutilizzabili e il loro smaltimento richiederebbe notevoli costi. I tipici produttori di pellet di legno sono quindi le grandi segherie e falegnamerie.

Il legno è composto principalmente da cellulosa e lignina; il calore sprigionato durante la fase di pressatura fa sì che la lignina presente rivesta le fibre di cellulosa determinandone la compattezza, e la pellettizzazione può così avvenire senza l’aggiunta di ulteriori sostanze collanti. Al pellet possono essere aggiunti amido, farine o oli vegetali, che ne migliorano la resistenza all’abrasione; quest’aggiunta è permessa fino a un valore massimo del 2%, anche se di regola non si supera lo 0,5%. Il pellet di legno si conserva preferibilmente in un luogo asciutto, adottando qualche piccolo accorgimento per proteggerlo dall’umidità. Per esempio non appoggiare i sacchi a terra, lasciandoli su bancali, accatastandoli e coprendoli con teli in plastica; nel caso di deposito appoggiandoli a pareti perimetrali, meglio inserire una lastra di polistirolo che faccia da isolante tra il bancale e il muro. Naturalmente è meglio consumare per primi i sacchi di pellet avanzati dalla stagione precedente.

La qualità è importante anche per i pellets: il consiglio è di usare solo pellets certificati, che non contengono agglomeranti chimico-sintetici o impurità (colle, vernici, plastica), presentano un’umidità residua assai contenuta (11-14%) e una frazione minima di polveri.

In passato gli scarti del legno come la segatura venivano buttati o utilizzati solo in parte mentre oggi, grazie alla produzione del pellet ed una sempre maggiore coscienza ambientale, questi materiali residui hanno una seconda vita ed un utilizzo pari al 100%.

Grazie alla pressatura il potere calorifico del pellet, a parità di volume (ma non di peso), è circa doppio rispetto al legno, e il valore energetico di un kilogrammo di pellet equivale all’incirca a mezzo litro di gasolio da riscaldamento o a mezzo metro cubo di metano. Inoltre, bruciando il pellet ha basse emissioni di CO₂ e NO_x.

Il pellet è quindi un combustibile pratico e pulito: è confezionato in sacchi da circa 15 kg ciascuno in plastica resistente che non permette fuoriuscite di materiale. Inoltre può essere certamente considerato un combustibile ecologico: la quantità di anidride carbonica (CO₂) contenuta nei fumi di combustione è la medesima quantità di anidride carbonica che la pianta ha utilizzato durante la crescita sottraendola all’atmosfera e le emissioni di NO_x sono basse.

3.1 Fasi di lavorazione

Il momento della produzione assume diverse forme a seconda della qualità della materia prima, delle dimensioni dell'impianto e, quindi, della sua capacità produttiva. Tuttavia, in linea di principio può essere schematizzato come di seguito:

Triturazione

Si affina la materia prima per mezzo di macchine dette appunto trituratorie.

Essiccazione

Fase molto onerosa necessaria ad abbassare il contenuto di umidità della biomassa.

Deferrizzazione

Eliminazione di eventuali corpi estranei di natura metallica dalla biomassa per mezzo di grandi magneti.

Macinazione

Passaggio della biomassa nel mulino a martelli per renderla polverulenta.

Pellettatura o pellettizzazione

Passaggio della farina di legno nella pressa che crea per estrusione i cilindretti di pellet

Depolverizzazione

(Eventuale) Privazione delle polveri residue per mezzo di setacci o sistemi di aspirazione.

Confezionamento

Imballaggio, posizionamento su bancali, avvolgimento del bancale con film plastico.

Andando nel dettaglio ho:

3.1.1 Acquisizione materia prima

La fase di trasformazione inizia con l'acquisizione del materiale. Esso, come si è detto, può essere di varia natura ed origine e può essere fornito da svariati produttori alla condizione che abbia caratteristiche piuttosto omogenee (questo perché i macchinari sono specifici per la qualità del materiale). Altre volte la materia prima è già presente in azienda come prodotto di scarto di un altro processo industriale, in ogni caso la biomassa deve essere rigorosamente costituita da legno vergine. È importante che la zona di accumulo sia ben riparata dalle intemperie, in modo tale da conservare il materiale nello stato in cui si trova. Se così non fosse si potrebbe verificare un aumento incontrollato dell'umidità della biomassa o, addirittura, uno

sviluppo incontrollato di muffe, che comporterebbe un aumento dei costi di essiccazione, nonché un irreparabile scadimento qualitativo.

3.1.2 Movimentazione

Consiste, generalmente, nel trasporto del materiale a mezzo di muletti dalla zona di accumulo alla macchina responsabile della prima trasformazione vera e propria: il trituratore. Tuttavia, nei casi in cui l'impianto di pellettizzazione è gestito da una segheria, i trituratori sono installati in continuo con l'impianto di prima lavorazione del legno e pertanto la movimentazione si limita a comprendere la fase di trasporto del materiale dal trituratore alla tramoggia che segna l'inizio dell'impianto di pellettizzazione.

3.1.3 Triturazione

Fa capo ad un macchinario detto per l'appunto "trituratore" il quale va a ridurre le dimensioni degli scarti di legno per renderlo idoneo alle fasi successive di lavorazione, si ottiene cioè il così detto "cippato" ovvero scaglie di legno della dimensione di 3-4 cm. Per la produzione di una tonnellata di pellet occorrono da sei a otto metri cubi di trucioli e segatura. Il "trituratore" è caratterizzato da una tramoggia di caricamento di dimensioni molto variabili (1) in funzione della capacità dell'impianto; è dotato di un'unità di triturazione a 2 o 4 alberi (3-4) con elementi taglienti costituiti da dischi a spigoli vivi, provvisti di uncini (2), che ruotano ad una velocità di 50/200 giri/min.

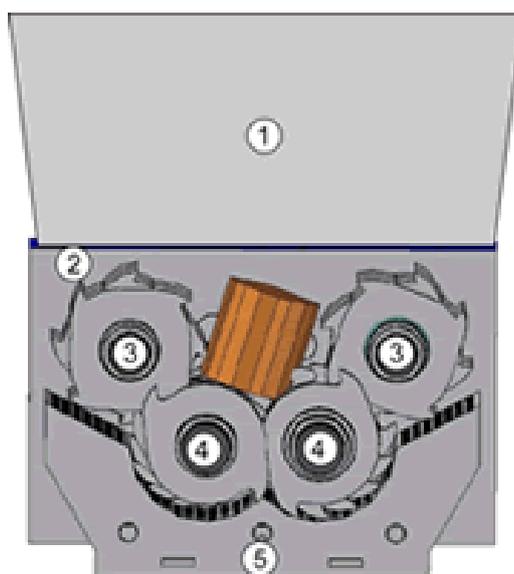


Fig. 3.1 *Trituratore a 4 alberi*

Ciascun uncino ha la funzione di "agganciare" il prodotto e di convogliarlo verso le frese le quali sono montate su due o più alberi-motore contro-rotanti, che provvedono

al taglio netto del materiale. Questa macchina è alimentata da un motore elettrico asincrono a corrente alternata e la sua potenza massima installata può variare da 7,5 Hp a 24 Hp, a fronte di capacità produttive rispettivamente di 80/150 Kg/h e 800/1200 Kg/h. Il prodotto triturato viene poi evacuato attraverso un vaglio con dimensioni variabili tra i 14 e i 300 mm che consente il controllo della granulometria, infatti, il pezzettame più grosso viene riportato in circolo per essere ulteriormente triturato; conseguentemente, per fori del vaglio più piccoli aumentano i passaggi che deve compiere il materiale attraverso il gruppo di triturazione e il tempo impiegato.

Per quanto riguarda la *manutenzione ordinaria*, questa prevede lo smontaggio dei dischi, operazione eseguibile direttamente dall'utente.

Per quanto riguarda la *manutenzione straordinaria* c'è da far presente che le migliori macchine della categoria presentano un dispositivo di sicurezza: questo va ad invertire temporaneamente il movimento delle lame in presenza di una quantità eccessiva di materiale in presa, o non triturbabile, prevenendo ogni sovraccarico strutturale o rottura della macchina.

3.1.4 Essiccazione

E' il processo critico della filiera per tutta una serie di motivazioni. Innanzitutto per l'alto costo del gruppo di essiccazione che, si aggira tra il 17 ed il 19% del costo dell'impianto di pellettizzazione. Parallelamente all'acquisto di un essiccatore, quindi, si registrerà necessariamente un aumento dei costi di esercizio causato da un ammortamento annuo più gravoso, maggiori costi di manutenzione ed energetici. In secondo luogo si ha che la tecnica di essiccazione può incidere sull'ambiente. Infatti, da uno studio pubblicato su "Biomass & Bioenergy", in cui sono stati trattati i cosiddetti "essiccatori per convezione", si parla in particolare del mezzo, della temperatura e dei tempi di essiccazione. Dallo studio è emerso che questi fattori vanno ad influenzare il contenuto finale di umidità del combustibile, nonché il suo contenuto di idrocarburi volatili, parametri direttamente proporzionali alle emissioni ed inversamente proporzionali al contenuto di energia del combustibile. Pertanto, riscontrare bassi livelli di umidità e di idrocarburi volatili valorizzerà il contenuto di energia contenuta nel combustibile, ed andrà a ridurre sensibilmente l'inquinamento atmosferico, soprattutto sul posto di lavoro. Inoltre da alcuni studi è emerso che il contenuto in ceneri del combustibile è fortemente influenzato dalla gestione della materia prima. Tra le altre cause, è stata identificata la contaminazione della materia prima a mezzo delle particelle separate dall'essiccatore. I risultati dimostrano che i pellet a rischio hanno un livello significativamente più alto di Silicio, ma anche di Ferro e Alluminio, nelle ceneri e risultano dare problemi di emissioni di scorie nel caso di bruciatori residenziali. Conseguentemente è auspicabile trattare attentamente questa fase per evitare contaminazioni di minerali; un "ciclone separatore" aggiuntivo potrebbe essere utilizzato per aumentare la qualità del pellet (Öhman M. et al. 2004). L'impianto di essiccazione, poi, ha grandi dimensioni e questo non è che un

altro grosso inconveniente. Tecnicamente esso, infatti, è costituito da un lungo tunnel nel quale viene convogliata dell'aria calda. Quest'aria entra a contatto con la materia prima che scorre lungo un nastro posto all'interno del tunnel e ciò provoca l'evaporazione dell'acqua. In definitiva questo processo è fondamentale, sia per le caratteristiche finali del combustibile, sia per la possibilità da parte della pressa di lavorare la materia prima; infatti, spesso quest'ultima è caratterizzata da un contenuto di umidità anche del 40%, quando il tasso ottimale per la macchina pellettatrice è del 12%.

3.1.5 Deferrizzazione

Una volta che il materiale è entrato nell'impianto di pellettizzazione vero e proprio, che in genere installato in continuo, l'operatore non dovrà più prendere parte al processo produttivo se non fornendo l'attività di controllo e di risoluzione di eventuali problemi dati dalle macchine. Infatti, dalla tramoggia di caricamento, il materiale triturato prosegue il suo "viaggio" grazie ad un nastro trasportatore che lo fa passare attraverso un "*deferrizzatore*": una macchina dotata di sistemi capaci di separare dalla massa vegetale qualsiasi corpo estraneo di natura metallica. Le apparecchiature più note della categoria sono dotate di uno o più magneti permanenti, od anche elettromagneti, e possono essere principalmente del tipo a tamburo oppure a nastro. In entrambi i casi, il grado di efficienza nella separazione può superare il 95%. Questa fase è estremamente importante per prevenire eventuali danni al resto della catena produttiva, nonché all'utente finale.

3.1.6 Macinazione

Il materiale necessita ora di una fase di riduzione dimensionale della pezzatura (inizialmente piuttosto variabile), contenendola entro specifici range di tolleranza predefiniti, al fine di agevolare le successive operazioni di trattamento. Questa attività viene svolta per via meccanica con l'ausilio di apparecchiature specifiche dette *mulini*, i quali agiscono sul materiale impiegando appositi utensili detti martelli. I mulini a martelli si presentano costituiti da una serie di masse (i martelli, per l'appunto) fissate ad un albero rotante (la velocità di rotazione tipica è pari a circa 1.000 giri/min), che colpendo ripetutamente il legno ne determina la frantumazione in parti via via sempre più ridotte. Quando, invece, avrà raggiunto dimensioni tali da poter attraversare i fori della griglia, allora potrà sfuggire all'azione dei martelli passando attraverso la precedente e, quindi, uscendo dal mulino. La regolazione della pezzatura del prodotto di uscita viene effettuata adottando griglie con fori di differente misura.

3.1.7 Pellettatura o pellettizzazione

Dal mulino a martelli esce un prodotto detto “*polverino*” di consistenza polverulenta, appunto; questo viene momentaneamente stoccato in dei silos dalle svariate forme e dimensioni, dopodichè attraverso un sistema di coclee torna in ciclo con le modalità ed i tempi dettati dalla macchina “centrale” dell’impianto: la “*pressa pellettizzatrice*”. Quindi, una volta superate le fasi preventive di lavorazione della materia prima che, si ricorda, hanno essenzialmente il fine di sminuzzare finemente, omogeneizzare, condizionare e stabilizzare la biomassa per avere un prodotto finito di caratteristiche costanti, la materia prima potrà essere pellettizzata. Il processo di pellettizzazione consiste nella pressatura del materiale di cui sopra attraverso una trafila forata che crea dei cilindretti più o meno compressi, normalmente dimensionati con diametri variabili da 2 a 12 mm e altezza media da 12 a 18 mm. Nel processo produttivo non viene utilizzato nessun collante né additivo chimico, in quanto l’addensamento e la compattazione sono ottenute attraverso la parziale fusione di alcune sostanze naturali presenti nel legno (lignina) che si verifica mediante la sua compressione e conseguente riscaldamento per effetto dell’attrito. In alcuni paesi è consentito l’uso dell’1-3% in peso di additivi collanti biologici per aumentare la coesione, come la fecola di patate, la farina di mais o un residuo dell’industria cartaria (black liquor). Il mercato del pellet richiede, inoltre, che il prodotto abbia una superficie esterna liscia e molto resistente all’abrasione, lucente e priva di incrinature per evitare la formazione di polveri di legno all’interno degli imballi per il trasporto; il prodotto deve inoltre possedere una buona resistenza al rigonfiamento per poter essere conservato agevolmente. E’ richiesto inoltre che il pellet abbia un’adeguata resistenza meccanica e che non si sbricioli facilmente; questo sia per evitare problemi durante il rifornimento dei silos, sia perché il polverino che si ottiene ha differenti caratteristiche di combustione. Tutte queste caratteristiche dipendono dalla macchina pellettizzatrice, e più in particolare da alcune sue caratteristiche tecniche quali:

- geometria dei canali di cubettatura;
- geometria del cono;
- geometria e tipo di materiali della filiera;
- quantità dei rulli;
- velocità dei rulli;
- distanza tra rulli-filiera;
- rapporto di compressione, passo e diametro.

In questa sede non verranno trattate tali caratteristiche tecniche, tuttavia occorre sottolineare che una delle questioni cruciali è senz’altro la distanza tra la trafila e il rullo; questa influenza non solo la qualità del prodotto ma anche la quantità di energia richiesta e l’usura della macchina. Alcune sperimentazioni condotte in Finlandia sembrano indicare che aumentando tale distanza da 0 a 1 mm aumenta la richiesta di energia di circa 1,2 volte ma, contemporaneamente, viene ridotta la quantità di polveri

prodotte del 30%. Le macchine pellettizzatrici di odierna produzione si differenziano per la disposizione e la forma della trafila all'interno del telaio in:

1) Macchine pellettizzatrici a trafila cilindrica verticale

Questo tipo di macchinari si suddividono a loro volta in due categorie:

- Pellettizzatrici cilindriche verticali con rulli di pressione interni
- Pellettizzatrici cilindriche verticali con rulli di pressione esterni.

Nel primo caso lo schiacciamento della biomassa avviene sulla superficie interna, tramite l'azione di due rulli mobili zigrinati (si arriva all'impiego di tre rulli sulle macchine di grosse dimensioni), montati su un supporto concentrico ed indipendente dal moto della trafila, con un sistema a forcella, affinché detti rulli percorrano il diametro interno della trafila in contro-rotazione rispetto al moto dell'utensile. La marcata zigrinatura sulla superficie cilindrica esterna dei rulli di pressione ha la funzione di aumentare l'attrito che si crea tra rullo e biomassa durante la fase di schiacciamento, al fine di impedire che il materiale da estrarre scivoli al di fuori della zona di pressione. L'estruso viene tranciato ad opera di coltelli fissi che agiscono sulla superficie esterna della trafila, mentre l'espulsione avviene per caduta libera nella tramoggia di scarico, ricavata nella campana di chiusura frontale della macchina. La rimozione dalla zona di accumulo del pellet, posta al di sotto della parte frontale della macchina può avvenire sia manualmente che in automatico tramite l'impiego di sistemi di trasporto. Un'alternativa allo schiacciamento dall'interno, pur mantenendo invariata la tipologia di trafila impiegata, è costituita dalle pellettizzatrici cilindriche verticali con rulli di pressione esterni. Queste macchine prevedono la pressatura della biomassa sulla superficie esterna dell'utensile e il successivo allontanamento del pellet dall'interno della trafila con condotte frontali di aspirazione.

2) Macchine pellettizzatrici a trafila piana

Questo tipo di pellettatrice differisce dalle macchine precedentemente descritte per la forma e la disposizione degli elementi che la costituiscono che sono sistemati in sequenza lungo l'albero longitudinale. Gli organi che operano l'estrusione consistono in una trafila piana sulla quale agiscono un numero di rulli che può variare da due a sei in funzione della dimensione della macchina. In alcuni modelli la trafila ruota ed i rulli rimangono immobili, in altre invece sono i rulli a percorrere l'area di schiacciamento mentre la trafila rimane immobile ed in altre macchine sia la trafila che i rulli possiedono un moto rotatorio. La pressatura avviene ad opera dei rulli di schiacciamento che percorrono la trafila piana, solidale con la struttura portante della macchina. All'interno della zona di schiacciamento, posizionati tra i rulli, sono inoltre alloggiati gli elementi raschianti che impediscono l'accumulo del materiale lungo il diametro esterno della superficie di pressione e sulle pareti più esterne della sezione.

La distanza dei rulli dalla trafilatura e la pressione da essi esercitata sul materiale da estrudere sono determinati da un'unità di regolazione ad azionamento idraulico, posizionata all'estremità dell'albero principale. I coltelli per la trafilatura del materiale estruso sono situati al di sotto della trafilatura e fissati all'albero rotante centrale. Dopo la trafilatura il prodotto cade su di un piano dal quale viene espulso tramite alcune palette messe in rotazione dall'albero. La superficie utile della trafilatura è quella sulla quale agiscono i rulli di pressione ed è compresa tra due circonferenze di raggio diverso. I rulli di pressione non possono ruotare simultaneamente alle diverse velocità periferiche richieste e si genera quindi uno slittamento tra rulli, biomassa e trafilatura.

Attualmente *in Italia* non risultano impianti funzionanti per la produzione di pellet che utilizzino la tecnologia sopra descritta, ma solo macchine a trafilatura cilindrica verticale

3.1.8 Depolverizzazione

È l'attività svolta da uno strumento detto appunto "*depolverizzatore*". Si tratta di un dispositivo applicato direttamente sulla macchina pellettatrice, il quale va ad aspirare le particelle fini reimmettendole in circolo per una nuova pressatura per assicurarsi che le stesse non superino l'1% ammesso dalle normative. Questa particolarità, riscontrabile solo nelle macchine più recenti, è l'ultima trovata nella produzione del pellet ed è stata suggerita dalle ricerche sulla qualità ambientale di questo prodotto; il pellet deve essere infatti privo di polveri per poter vantare basse emissioni.

3.1.9 Confezionamento

Una volta ottenuto il pellet, questo viene trasportato tramite dei nastri in una tramoggia sopraelevata che costituisce parte integrante della macchina per l'imballaggio. Questa è caratterizzata inoltre da un dosatore e da una bilancia in grado di fornire il quantitativo di materiale richiesto. Le confezioni possono essere di diverse tipologie: sacchi da 10, 15, 25 Kg fino ad arrivare ai cosiddetti "big bag" da 1,5 m³ (Bossler-Peverelli V., Ventura B. 2002). Tra i piccoli formati il più utilizzato in assoluto è quello da 15 Kg, tuttavia, da una piccola ricerca effettuata presso alcuni rivenditori umbri è emerso che si ripercorre con una certa frequenza la richiesta di sacchi di dimensioni più contenute (comunque non inferiori ai 10 Kg). Tutto ciò è comprensibile se si pensa alle difficoltà che taluni soggetti incontrano nella movimentazione del combustibile tra le mura domestiche (utenti anziani, locali di stoccaggio lontano dal combustore, scale scomode, ecc.). Anche il tessuto da cui vengono ricavati i vari sacchetti può assumere diverse forme. Nel caso particolare dell'insacchettamento a caldo del pellet, cioè nel caso in cui non si attende il suo raffreddamento, si è tuttavia obbligati ad impiegare uno specifico tipo di sacchetto: il "plastico-microforato". Questi speciali sacchetti, sono resi necessari dalle alte

temperature del pellet, ottenute a causa delle forti pressioni di esercizio della macchina pellettatrice e dell'attrito di questa con il legno. In generale, si possono utilizzare anche confezioni in nylon, per le quali tuttavia è necessaria una fase di raffreddamento.

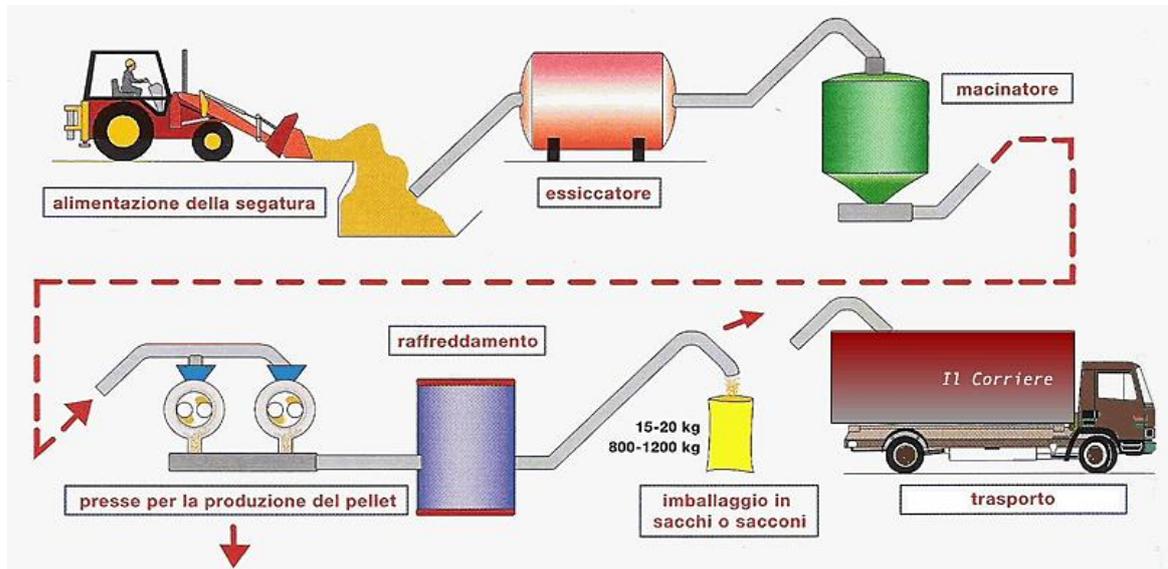


Fig. 3.2 *Ciclo di Produzione del Pellet*

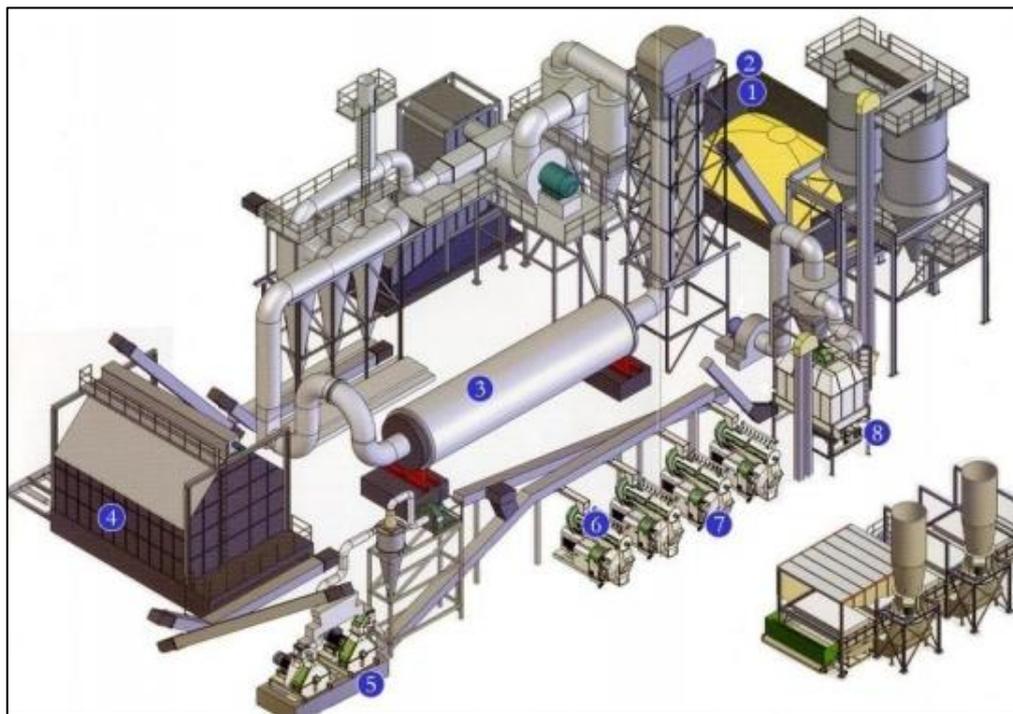


Fig. 3.3 *Rendering di un Pellettificio*

- 1-2: Magazzino della materia prima;
- 3: Essiccatore;
- 4: Silo per il conferimento del materiale essiccato;
- 5: Raffinatori;
- 6: Condizionamento della materia prima;
- 7: Presse di Pellettizzazione;
- 8: Raffreddatore.

3.2 Qualità del pellet

Non è affatto semplice parlare di qualità quando si parla di pellet. Esistono differenti tipologie di pellet. Spesso un tipo di pellet è adatto ad un particolare scopo: l'utilizzo in caldaie, in centrali termiche o in stufe casalinghe.

Lo stesso pellet può fornire rese differenti tra diversi modelli di stufe, talvolta anche nell'ambito della stessa marca. Si potrebbe affermare pertanto che la qualità del pellet è relativa. Non è quindi possibile definire il pellet migliore per tutti gli usi: esiste solo un pellet più adatto per un particolare uso.

Anche se sembra avere un filo logico, questa affermazione non potrebbe essere più sbagliata. Il concetto di "qualità" deve essere unico e deve avere un riscontro oggettivo (le analisi del pellet) in modo tale che tutti possano riconoscere un pellet di qualità ancor prima di vederlo bruciare.

La normativa sul pellet è ancora carente. Ci sono due leggi molto conosciute che parlano di qualità e sono la DIN tedesca e la O-NORM austriaca, non cogenti in Italia ma diventate ormai un buon riferimento per tutti i consumatori italiani. Queste normative portano alla suddivisione del pellet in categorie in base ad alcuni parametri di qualità.

È consigliabile non fossilizzarsi ostinatamente su normative o marchi di qualità ma di confrontare i parametri di qualità che troviamo stampati sul sacchetto con dei parametri di riferimento.

Infatti l'efficacia della combustione non dipende soltanto dalla tecnologia delle apparecchiature ma anche dalle caratteristiche chimico-fisiche della biomassa. Semplificando è importante tenere in considerazione i seguenti parametri:

➤ *Potere calorifico:*

parametro fondamentale per valutare la qualità del legno (sia esso in forma di ciocchi, pellet o cippato), e per comprenderne le potenzialità energetiche anche in comparazione con i combustibili fossili. Il potere calorifico di un combustibile indica la quantità di energia che può essere ricavata dalla combustione completa di un'unità di peso, viene valutato a partire dalla biomassa secca mediante l'ausilio di un calorimetro, nel quale avviene la combustione di un campione di massa nota. Il calorimetro fornisce il valore dell'energia termica liberata dalla combustione attraverso la misura del calore di raffreddamento dei gas combusti fino alla temperatura di 25°C. Conseguentemente, la misura del calorimetro rappresenta più propriamente il potere calorifico superiore della biomassa su base secca (PCS_0). I valori tipici del potere calorifico superiore della maggior parte delle biomasse secche sono compresi fra 19 e 22 MJ/kg. Ai fini pratici, piuttosto che il potere calorifico superiore, risulta di più diretto interesse il potere calorifico inferiore (PCI), che viene valutato sottraendo al potere calorifico superiore il calore di condensazione dell'acqua, dal momento che nella pratica l'acqua presente nei prodotti della combustione viene riversata in atmosfera allo stato di vapore. Per un dato valore del PCS_0 , il potere calorifico inferiore sul secco PCI_0 si calcola a partire dal calore

di condensazione dell'acqua r e della frazione massica di idrogeno H nella biomassa secca:

$$PCI_0 = PCS_0 - 9Hr$$

Essendo il quantitativo d'acqua prodotto dalla combustione pari a 9 volte il quantitativo di idrogeno presente nel combustibile. I valori tipici del potere calorifico inferiore su base secca sono solitamente dell'ordine di 18÷20 MJ/kg. Bisogna però porre attenzione alle unità di misura infatti alcuni lo esprimono in Kcal, altri in Kwh ed altri ancora in MJ.

È necessario tenere presente che:

il fattore di conversione è 1kwh=860 Kcal;

- chi scrive 5.000 Kcal sta facendo un po' di confusione con le unità di misura, infatti il massimo potere calorifico ricavabile dal legno è di circa 4.700 Kcal;
- La tabella sottostante confronta i diversi poteri calorifici, in kWh termici prodotti per ogni kg bruciato, da combustibili fossili e da biomasse legnose.

Combustibili da biomassa	Potere calorifico netto (kWh/kg)
Legna da ardere (25% umidità)	3,5
Cippato pioppo (25% umidità)	3,3
Pellet di legno (max 10% umidità)	4,9
Combustibili fossili	
Gasolio	11,7
Metano	13,5
GPL	12,8

Tabella 4: Confronto tra i poteri calorifici del legno e dei combustibili fossili

Fonte: ITABIA

- Dalla tabella risulta evidente come il potere calorifico del legno sia inferiore rispetto a quello dei combustibili fossili. Infatti, per produrre l'energia di un litro di gasolio, occorrono circa 3 kg di legna da ardere.
- Possiamo quindi facilmente calcolare il vantaggio economico del legno: se la legna da ardere ha un costo di 0,10 €/kg, spendendo circa 0,30 € posso ottenere il calore che ricaverai da un litro di gasolio (costo circa 1,2 €/litro). In definitiva, a parità di contenuto energetico e quindi di calore ottenuto, la legna mi costa circa 1/4 rispetto al gasolio e la metà rispetto al metano.

➤ **Umidità:**

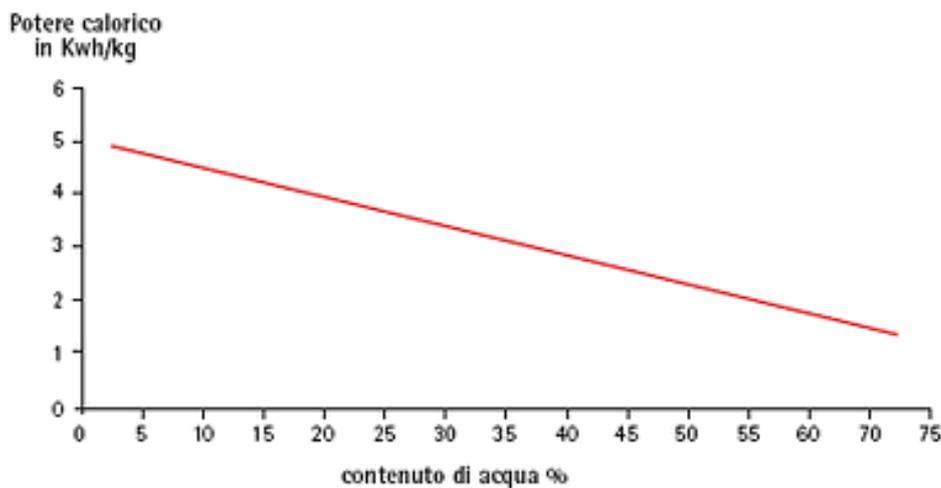
Esprime il contenuto d'acqua di una biomassa e può essere riportata sul tal quale o sul secco.

Indicando con m_A la massa di acqua e con m_S la massa di sostanza secca avrò:

$$\text{Umidità sul tal quale} = U = \frac{m_A}{m_A + m_S} = 0 \div 1$$

$$\text{Umidità sul secco} = U_0 = \frac{m_A}{m_S} = 1 \div \infty$$

Il potere calorifico del legno è un parametro variabile, che aumenta al diminuire dell'umidità. L'acqua contenuta nel legno, infatti, è nemica di una buona combustione, come si può vedere nella seguente grafico.



Si nota infatti che l'energia effettivamente recuperabile a seguito di un processo di combustione, diminuisce linearmente con l'umidità, fino ad annullarsi del tutto per valori di umidità dell'ordine dell'88-90%. In pratica, la combustione di biomasse con valori di umidità superiori al 65-70% non è in grado di sostenersi.

Il legno, subito dopo essere stato raccolto, presenta un alto contenuto di acqua, superiore al 50%. Per questo motivo la legna viene fatta *stagionare* al coperto e all'asciutto per 2-3 anni, in modo da ridurre l'umidità a valori ottimali per la combustione, intorno al 25%. Anche il cippato, come la legna, risulta all'inizio molto umido e deve quindi subire un processo di stagionatura.

Il pellet invece grazie al particolare processo di lavorazione cui è sottoposto, predilige valori di umidità circa pari o inferiore all'8% anche se alcuni marchi di qualità si accontentano del 10%. L'acqua presente nel pellet consuma una parte del potere calorifico sviluppato in combustione per passare dallo stato liquido ad aeriforme, pertanto tanto più l'umidità è bassa tanto meno sprechi avrò in fase di combustione. Questo, insieme alle tipiche caratteristiche di compattezza e omogeneità, ne spiega l'alto potere calorifico.

Secondo quanto stabilito dalle normative, la determinazione dell'umidità si effettua come spiegato precedentemente nel paragrafo 1.7 attraverso il metodo gravimetrico, pesando un campione di biomassa tal quale e introducendolo in una stufa ventilata e termostata a 103°C (±2°C). la quantità di acqua evaporata, e quindi l'umidità sul tal quale si valuta misurando differenza fra il peso iniziale del campione m_I e quello finale m_F :

$$U = \frac{m_I - m_F}{m_I}$$

➤ **Residuo in ceneri:**

frazione sul tal quale di materiale inorganico che si ritrova come residuo alla fine del processo di combustione. Elevati valori del tenore di ceneri determina una riduzione del potere calorifico, un aumento dei costi di smaltimento delle ceneri e maggiori problemi legati alla possibile formazione di incrostazioni, corrosioni ed erosioni nella caldaia.

Il tenore di ceneri si misura subito dopo la misura dell'umidità, ovvero a partire dalla sostanza secca. Il campione di biomassa secca viene macinato finemente (fino a dimensioni tali da attraversare un setaccio con maglie aventi 1,5 mm di lato) e introdotto in un forno a muffola termostato a 750°C (±25°C) al fine di ottenere la completa combustione. Il contenuto di ceneri su base secca è solitamente compreso fra lo 0,5 e l'1,5%.

➤ **Presenza di corteccia:**

la sua presenza nel pellet è inversamente proporzionale alla qualità in quanto questa abbassa il potere calorifico e aumenta il residuo in ceneri.

Inoltre si può fare una prima verifica ancora in negozio, è controllare che il sacco non contenga molta polvere di legno.

La scelta dell'essenza — abete, faggio, rovere — dipende dalla stufa che si usa e da preferenze personali. Il rovere produce un pellet di colore più scuro. Fa più fatica ad accendersi rispetto al faggio ed all'abete, ma brucia più lentamente e produce più bruce con una fiamma meno viva. Al contrario, l'abete si accende molto facilmente, funziona con ogni stufa ma brucia velocemente. Il faggio rappresenta una via di mezzo tra i due.

La qualità del pellet dipende quindi da molti fattori: il tipo di essenza, la granulometria, il suo stato di conservazione, la modalità di manipolazione, la modalità di essiccamento, la modalità di macinazione ed il processo di cubettatura. Spesso si guarda solo all'essenza o al colore ma è estremamente riduttivo.

I pellet non di qualità hanno un rendimento basso e, anche costando meno, possono aumentare i costi del riscaldamento. Lasciano più cenere ed arrivano a volte a bloccare la caldaia.

Per quanto riguarda la *materia prima*, si tratta di scegliere il tipo di legno (abete, faggio, larice, rovere...) e soprattutto di verificare che non contenga leganti sintetici, vernici o terra. Mentre la presenza di vernici dipende dall'utilizzo di legni non vergini come

materia prima (ad esempio infissi di finestre o scarti di pannelli truciolari), la presenza di terra è generalmente causata da uno stoccaggio non curato della segatura.

Dalla *fase di produzione* dipende invece la consistenza del pellet. Come abbiamo detto, è importante che nel nostro pellet non siano presenti colle o leganti sintetici di alcun tipo. Come fa allora la segatura a stare insieme? Durante il processo di cubettatura, viene compressa attraverso una trafilatura — essenzialmente un anello d'acciaio con tanti buchi — e si scalda. Il fattore fondamentale è qui la pressione a cui viene sottoposta la segatura: maggiore la pressione, maggiore la temperatura, migliore il pellet. Pellet prodotti con macchinari non adatti o risparmiando sull'energia bruceranno molto più in fretta diminuendo il rendimento della stufa o della caldaia.

Nella pagina che segue vengono riportate alcune verifiche che possono essere fatte per controllare la qualità del pellet.

Caratteristiche	Possibili verifiche
Durante la combustione, l'odore deve essere lo stesso di quando si brucia del legno	Se durante la combustione il pellet emana un odore differente da quello della legna, potrebbe essere necessario verificare il contenuto del prodotto
Il pellet non deve contenere leganti o additivi	Il pellet che non contiene additivi si disfa quando supera un certo livello di umidità. Per provare, è sufficiente metterne un po' nell'acqua: i vari elementi di segatura dovrebbero impregnarsi d'acqua e separarsi
Il pellet deve contenere poca polvere di legno	La presenza di una grande quantità di polvere di legno nel pellet è indice di un pellet che si sgretola.
Il colore deve essere simile a quello del legno	Il pellet deve essere di un colore omogeneo simile a quello del legno. Il colore può variare a seconda del tipo di legno usato e del contenuto o meno di corteccia. La parte superficiale può essere scura a causa del processo di produzione. Il pellet non deve contenere altro se non legno: particelle di vernice, plastica o simili potrebbero rovinare l'impianto ed essere dannose per la salute
Il contenuto di umidità deve essere inferiore all' 8%	Un pellet dal contenuto d'acqua troppo elevato, come nel caso del punto precedente, non mantiene la sua consistenza. La presenza di umidità diminuisce la resa della combustione perchè parte dell'energia viene usata per far evaporare l'acqua. Un pellet con un alto contenuto di umidità produce un fumo bianco durante la combustione

Tabella 5: *Caratteristiche di un pellet di qualità e metodi di verifica.*

Fonte: *English Handbook for Wood Pellet Combustion*

3.3 Formula semplificata per il calcolo del fabbisogno annuale di pellet

Quando dobbiamo ordinare il pellet e non abbiamo uno storico dei consumi perché abbiamo appena installato la stufa, oppure perché la passata stagione lo abbiamo acquistato in più volte, ci troviamo di fronte al problema della stima dei fabbisogni annuali. Di certo non è cosa facile in quanto esistono stufe di diverse dimensioni e tipologie, inverni più o meno lunghi, abitazioni più o meno isolate termicamente, ecc. Insomma, i parametri di cui dovremmo tener conto sono un'infinità, ma grazie a questa formula avremo di certo una buona approssimazione dei nostri consumi annuali di pellet.

$$X = \beta * Y * \delta * \sigma$$

dove:

- **X** è il nostro fabbisogno annuale di pellet;
- **β** è il numero di giorni che compongono un inverno alle nostre latitudini;
- **Y** è il numero di ore giornaliere che teniamo accesa la nostra stufa;
- **δ** è il consumo orario della nostra stufa in Kg/h;
- **σ** è il coefficiente dimensione abitazione;

se non sappiamo ipotizzare questi valori ci si può aiutare con le tabelle a seguire.

Tabella 6: Lunghezza media degli inverni in giorni, per zone d'Italia (β)

NORD	CENTRO	SUD E ISOLE
210	180	160

Tabella 7: Consumo medio orario per tipologia di stufa (δ) in [kg/h]

CATEG/MOD	<10kw	10<X<15	>15
IDRO	-	2	2,3
ARIA	0,8	1,2	-

Tabella 8: Coefficiente dimensione abitazione (σ)

<80 mq	80<x<150	>150 mq
0,9	1	1,1

ALCUNI ESEMPI:

- Il Sig. Rossi vive in Umbria ($\beta = 180$) in un appartamento di 100 mq ($\sigma = 1$) con la sua famiglia. Possiede una stufa ad aria 12 KW ($\delta = 1,2$) con la quale riscalda tutta l'abitazione. Avendo la madre anziana a casa la stufa deve restare accesa dalle 07 am alle 21 pm ($Y = 14$).

$$\text{Fabbisogno} = 180 \times 14 \times 1,2 \times 1 = 3.024 \text{ kG (circa 3 bancali)}$$

- Il Sig. Bianchi vive in Trentino ($\beta = 210$) in un appartamento di 70 mq ($\sigma = 0,9$) con sua moglie. Possiede una stufa idro 22 KW ($\delta = 2,3$) con la quale riscalda tutta l'abitazione. Lavorano tutti fuori casa pertanto i Bianchi programmano l'accensione automatica della stufa alle 15 pm in modo tale da trovare la temperatura desiderata al momento del rientro a casa. La stufa si spegne automaticamente alle 23 pm ($Y=8$).

$$\text{Fabbisogno} = 210 \times 8 \times 2,3 \times 0,9 = 3.478 \text{ kG (circa 3,5 bancali)}$$

NEL NOSTRO CASO:

- Essendo l'abitazione considerata Ubicata in provincia di Vicenza avremo $\beta = 210$.

La superficie complessiva è pari a circa 173 mq ho $\sigma = 1,1$.

Ipotizzando inoltre di utilizzare una stufa Aria 15kw con $\delta = 1,2$ per 8 ore al giorno, ottengo:

$$\text{Fabbisogno} = 210 \times 8 \times 1,2 \times 1,1 = 2217,6 \text{ kG (circa 2,5 bancali)}$$

3.4 Combustione e fumi

La combustione del pellet produce dei fumi di scarico. Perché questi non siano dannosi per la salute e l'ambiente, il pellet deve contenere solo legno. Non sono necessarie colle per tenere insieme la segatura e la materia prima non deve contenere vernici o impregnanti. La lignina, naturalmente contenuta nel legno, è un legante sufficiente.

pellet di legno:	0.108 g/MJ
paglia:	0.108 g/MJ
gasolio:	0.972 g/MJ
gas naturale:	0.720 g/MJ

Tabella 9: Emissioni di CO₂ per diversi tipi di combustibile a parità di energia prodotta

Per il pellet e la paglia, solo la quantità di CO₂ emessa durante il trasporto deve essere presa in considerazione. La quantità prodotta durante la combustione è la stessa che viene sottratta dall'atmosfera durante la crescita della pianta.

In questo modo, bruciare del pellet è come bruciare della legna, con il vantaggio di una maggiore efficienza e praticità.

Svantaggi rispetto al classico camino: è meno romantico e non ci si può fare la grigliata (ma esistono delle cucine a pellet).

I fumi di scarico contengono diverse sostanze: principalmente anidride carbonica, ossigeno, vapor d'acqua ed un po' di ceneri. Diossido di zolfo e nitrogeno compaiono in percentuali molto minori al resto.

Guardando i fumi di scarico è possibile fare una prima verifica sul buon funzionamento del prodotto e della stufa. Alcune delle possibili osservazioni da fare sono le seguenti:

Aspetto del fumo	Qualità della combustione
Nessun o poco fumo visibile quando il boiler è in funzione	La combustione è buona e la quantità d'aria fornita è corretta
Fumo bianco, che svanisce velocemente all'aria aperta	Il fumo contiene vapor d'acqua. La causa probabile è un combustibile contenente umidità
Fumo visibile, grigio o più scuro. Possono esserci particelle visibili di cenere.	Il fumo contiene della cenere. Probabilmente la velocità dell'aria fornita è troppo elevata e la combustione non avviene completamente.
Fumo spesso e scuro, con odore di catrame	La combustione non avviene correttamente ed una grande quantità di CO ₂ è dispersa nell'atmosfera. E' necessario verificare che la quantità d'aria fornita sia adatta alla quantità di combustibile fornita

Tabella 10: Possibili controlli sul fumo per verificare la qualità della combustione.

Fonte: *English Handbook for Wood Pellet Combustion*

4. SIMULAZIONI CON SOFTWARE ECODOMUS

4.1 Software Ecodomus

Il software *Ecodomus.vi* è una cartella di calcolo in formato xls. che a partire dai dati geometrici e delle caratteristiche termofisiche dell'involucro e da quelle dell'impianto, consente di valutare secondo il protocollo Ecodomus le prestazioni energetiche di un edificio.

Nella versione utilizzata vengono in particolare determinati:

- Il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento invernale;
- Il fabbisogno di energia primaria annuale per la produzione di acqua calda sanitaria annuale;
- La capacità termica, in termini di costante di tempo, delle strutture opache e il surriscaldamento strutturale massimo, ovvero l'aumento massimo della di temperatura delle strutture determinato dalla radiazione solare entrante dalle superfici trasparenti.

L'inserimento dei dati caratteristici è effettuato attraverso apposite tabelle che consentono la compilazione diretta (celle a sfondo giallo) o la scelta di opzioni attraverso menu a tendina o caselle di selezione. In molti casi sono riportati anche i risultati parziali di calcolo, disponibili per una diretta verifica da parte dell'utente, in celle non modificabili (sfondo arancio).

Lo spostamento e la selezione delle celle sulle quali operare sono possibili sia con l'uso del mouse, sia con l'uso delle frecce e/o del tasto di tabulazione. Questa ultima opzione può risultare più comoda nell'accesso sequenziale ai campi da completare.

La cartella di lavoro è articolata in 12 fogli di lavoro organizzati in 7 gruppi che sono identificati dal medesimo numero nel foglio e dalla colorazione della etichetta.



Fig. 4.1 Etichette del foglio di lavoro

I gruppi di fogli sono i seguenti:

- **Foglio 0 = Dati generali:** è presente un solo foglio dedicato all'inserimento dei dati generali del progetto quali la località (Es: Comune, il dato viene inserito per poter assegnare i dati climatici locali), la destinazione d'uso (se ad uso residenziale commerciale ecc.), le dimensioni complessive;

➤ **Foglio 1 = Pareti e vetrate:** sono presenti 3 fogli della medesima impostazione per l'inserimento della descrizione della composizione rispettivamente:

❖ **Foglio 1a = Pareti opache** (fino a dieci tipologie).

Il foglio è articolato in 10 tabelle, una per tipo di componente edilizio (pareti, solai, copertura) ad eccezione dei solai a terra e delle pareti contro il terreno.

Ogni tipo di componente è numerato con un numero da 1 a 10. Non sono previsti più di dieci tipi di componenti edilizi. Per ciascun componente vanno indicati i materiali che costituiscono i diversi strati e le rispettive caratteristiche.

I dati inseriti in questo foglio vengono utilizzati per il calcolo delle dispersioni termiche per trasmissione, verso l'ambiente esterno e verso i locali non riscaldati; per il calcolo della capacità termica e quindi del fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti e il surriscaldamento strutturale durante i mesi estivi.

Vanno considerate sia le tipologie di parete che racchiudono l'ambiente riscaldato e quello non riscaldato, sia le pareti interne all'ambiente riscaldato, che ne condizionano la capacità termica.

❖ **Foglio 1b =**

▪ **Pareti contro terra** (fino a 5 tipologie).

Il foglio è articolato in 5 tabelle, una per tipo di parete a contatto con il terreno.

Le pareti da descrivere sono tutte le pareti perimetrali che dal lato esterno si trovano a contatto con il terreno, sia quelle dell'ambiente riscaldato, che quelle dell'ambiente non riscaldato adiacente alla zona termica.

I dati qui inseriti vengono utilizzati per il calcolo dello scambio termico a terreno.

Le pareti perimetrali rivolte verso l'esterno che arrivano fino al terreno, già inserite nei fogli "1a Pareti opache", vanno inserite nuovamente anche in questo foglio. Saranno considerate come pareti con profondità di interrimento nulla nel foglio "2b Dim. Part. Contro terra".

▪ **Pavimenti contro terra** (fino a 5 tipologie).

Il foglio è articolato in 5 tabelle, una per tipo di pavimento contro terreno.

I tipi di pavimento da descrivere sono tutti quelli che poggiano sul terreno, sia quelli dell'ambiente riscaldato, che quelli dell'ambiente non riscaldato adiacente alla zona termica.

In caso di pavimenti su intercapedine, inserire il componente nel foglio "1a Pareti opache" poiché nel calcolo delle dispersioni tale

componente sarà considerato come componente che confina con l'ambiente esterno.

I dati qui inseriti vengono utilizzati per il calcolo dello scambio termico a terreno.

❖ **Foglio 1c = *foglio per l'inserimento della composizione e delle dimensioni unitarie delle componenti vetrate*** (fino a 10 tipi di finestra semplice e altrettanti di finestra doppia).

Il foglio è articolato in due tabelle in cui inserire le caratteristiche delle componenti finestrate (vetro e telaio).

La prima tabella viene utilizzata per inserire le caratteristiche delle finestre singole.

Nella seconda tabella vanno inserite le caratteristiche delle finestre doppie, cioè caratterizzate da due serramenti che chiudono lo stesso foro-finestra, uno rivolto verso l'interno dell'edificio e uno rivolto verso l'esterno dell'edificio. Le componenti finestrate doppie sono in particolare ottenute come combinazione di due componenti singole. Ma dato che nella costruzione presa in esame tale tipologia non è presente questa parte del foglio viene trascurata.

Nel complesso vanno descritte tutte le componenti vetrate, fisse o mobili che siano, sia quelle dell'ambiente non riscaldato, sia quelle poste tra l'ambiente riscaldato e qualunque altro ambiente.

Tra le caratteristiche, a differenza delle componenti opache, sono anche richieste le dimensioni geometriche, dato che queste condizionano le prestazioni, in particolare il rapporto tra la superficie occupata dal telaio e quella trasparente.

➤ **Foglio 2 = *Dimensioni***: sono presenti 3 fogli per l'inserimento rispettivamente delle:

❖ **Foglio 2a = *dimensioni e delle esposizioni delle pareti opache***.

Nel foglio vanno inserite le aree dei componenti già descritti nel foglio "1a Pareti opache". È assunta la convenzione di utilizzare le superfici interne nette, computate cioè sulle dimensioni all'interno dell'ambiente, al netto quindi degli spessori di muri, tramezze e solai.

Per ogni tipo di parete definita nel foglio "1a Pareti opache" si inseriscono le dimensioni nelle diverse orientazioni rivolte verso l'esterno, quelle rivolte verso l'esterno, quelle rivolte verso ambienti riscaldati e ambienti non riscaldati e le dimensioni nelle diverse orientazioni da ambienti non riscaldati verso l'esterno.

Per ogni orientazione esterna si devono selezionare valori corretti per il fattore divista del cielo, legato alla presenza di ostruzione e aggetti, e

per il colore, che determina il coefficiente di assorbimento della radiazione solare.

❖ **Foglio 2b = dimensioni delle partizioni contro terra.**

Nel foglio vanno inserite le dimensioni caratteristiche dei componenti che toccano il terreno, sia che si tratti di componenti che delimitano ambienti riscaldati, sia che delimitano ambienti non riscaldati adiacenti a quelli riscaldati.

Le strutture definite nei fogli “1b Pareti contro terra” e “1b Pavimenti contro terra” vanno descritte in maniera accoppiata, specificando per ogni tipo di pavimento contro terra le caratteristiche delle pareti verticali interrate in contatto con questi.

❖ **Foglio 2c = numero e dell'esposizione delle componenti vetrate.**

Nel foglio va inserito il numero di ciascun tipo di componente finestrato descritto nel foglio “1c Componenti vetrate” (nel quale sono già stati riportati dimensioni e fattori che ne caratterizzano le prestazioni), distinguendone l'orientazione al fine di determinare le dispersioni termiche e gli apporti solari.

Sono accomunate data l'equivalenza dei carichi solari le esposizioni Nord Ovest – Nord Est, le Est – Ovest, le Sud Ovest – Sud Est.

Sono specificabili anche eventuali componenti vetrate di separazione tra ambienti riscaldati e ambienti non riscaldati.

L'inserimento viene effettuato per ciascuno dei 10 tipi di componenti finestrati singoli (Vetrata1, Vetrata 2...) nella tabella “numero e orientazione componenti finestrate singole”.

➤ **Foglio 3 = Ponti termici:** è presente un solo foglio per l'inserimento delle lunghezze dei diversi tipi di ponti termici presenti.

Nel fogli vanno inseriti i dati utili per il calcolo delle dispersioni termiche dovute ai ponti termici lineari seguendo il metodo della norma UNI EN ISO 14683 “Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineica. Metodi semplificati e valori di riferimento”.

Il foglio riporta uno schema di edificio (Fig. 4.) che mostra le tipologie e la posizione dei ponti termici più comuni e di cui la UNI EN ISO 14683 fornisce i coefficienti termici lineici.

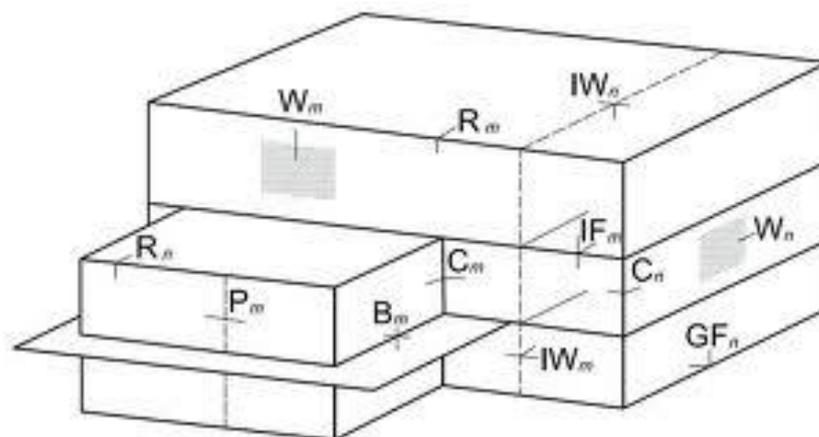


Fig. 4.2 Schema edificio con riportati le identificazioni dei principali pnti termici

- **Foglio 4 = Ventilazione:** è presente un foglio di calcolo dedicato alla caratterizzazione degli scambi d'aria con l'esterno, eventualmente in presenza di un sistema di recupero termico.

I dati inseriti in questo foglio servono per il calcolo delle dispersioni di calore per ventilazione. Vengono considerate sia la ventilazione naturale, sia la ventilazione meccanica e, in quest'ultimo caso, la possibilità di fare un recupero termico sull'aria espulsa.

- **Foglio 5 = Impianti:** il foglio per l'inserimento dei dati degli impianti consente di caratterizzare le soluzioni in termini di sistemi di produzione del calore per riscaldamento e acqua calda sanitaria e dei sistemi di emissione, regolazione e distribuzione del calore includendo il solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria e le pompe di calore geotermiche per il riscaldamento.

Nel foglio vanno quindi inseriti i dati riguardanti l'impianto di produzione di acqua calda sanitaria e l'impianto di riscaldamento. Questi dati sono utili per il calcolo delle perdite dell'impianto e quindi del suo rendimento globale medio stagionale.

Il foglio si articola in due sezioni, la prima relativa alle caratteristiche dell'impianto di produzione acqua calda sanitaria, la seconda all'impianto di riscaldamento

- **Foglio 6 = Risultati:** il foglio dei risultati fornisce indicazioni sintetiche sulla prestazione energetica dell'edificio e degli impianti, indicandone la classe energetica.

Nel foglio vengono visualizzati i risultati dei calcoli sulla base dei dati inseriti.

Il foglio è un fac-simile del certificato energetico così come progettato.

È consigliabile procedere con l'inserimento dei dati nell'ordine previsto dalla posizione dei fogli.

Il calcolo viene effettuato per l'ambiente riscaldato, considerando come tale l'unità o l'insieme delle unità abitative servite da un unico impianto di riscaldamento.

Nella descrizione dell'edificio si deve tenere presente che le dispersioni vengono valutate considerando sia la trasmissione diretta dall'ambiente riscaldato verso l'esterno (aria esterna e terreno), sia quella indiretta attraverso gli ambienti non riscaldati a contatto con quello riscaldato.

Si dovranno pertanto inserire sia i dati relativi alle partizioni che dividono l'ambiente riscaldato dall'esterno, sia quelli relativi alle partizioni che separano l'ambiente riscaldato da quelli non riscaldati e questi ultimi dall'esterno.

Nel valutare la capacità termica dell'ambiente riscaldato, occorre infine considerare anche le pareti interne all'ambiente stesso o quelle che lo separano da altri ambienti riscaldati.

Naturalmente, tali indicazioni non incidono sulla determinazione delle dispersioni.

4.2 Descrizione sintetica dell'abitazione in esame

La casa analizzata nei vari casi di studio è la porzione sinistra di una bifamiliare di colore chiaro situata nel comune di Bressanvido, provincia di Vicenza.

Dati caratteristici della zona geografica:

- Bressanvido (VI);
- Latitudine: 45°38'42"72 N;
- Longitudine: 11°38'7"08 E;
- Zona climatica E;
- Gradi giorno GG=2371;

Lo studio è stato inoltre ampliato ipotizzando che la stessa porzione di bifamiliare sia situata nel comune di Pieve di Cadore, provincia di Belluno.

Dati caratteristici della zona geografica:

- Pieve di Cadore (BL);
- Latitudine: 46°25'26"04 N;
- Longitudine: 12°21'43"20 E;
- Zona climatica F;
- Gradi giorno GG=4055;

La bifamiliare considerata è costituita da due porzioni residenziali, con esattamente la stessa planimetria, separate dai garage, unico ambiente considerato non riscaldato. Ma come detto in precedenza, lo studio sarà svolto solo su una delle due porzioni, che nello specifico è la sinistra.

Per quanto riguarda l'esposizione dei vari lati dell'unità bifamiliare si nota che, seguono esattamente i punti cardinali. Entrambe le facciate frontali sono poste a nord, e entrambe le facciate sul retro sono poste a sud. Unica differenza si ha per le pareti laterali esterne (cioè quelle non comunicanti coi garage) che saranno, per una porzione abitativa esposti a est e per l'altra ad ovest, ma ciò a livello di calcolo non porta ad alcuna variazione. Stesso

discorso lo si può fare per le pareti comunicanti in parte col box auto e in parte con l'esterno.

Durante l'arco della giornata la struttura non subisce ombreggiamenti rilevanti in nessuna direzione, fatta eccezione per il lato a sud del piano terra che è caratterizzato da un ampio portico, e per delle piccole porzioni del lato nord, anch'esse caratterizzate da un piccolo portico anche in questo caso speculare x le due unità.

La zona non riscaldata considerata nello studio si limita al garage, mentre tutte le altre sono da ritenersi zone riscaldate per la presenza dei radiatori. In realtà alcune stanze sono utilizzate come ripostiglio e quindi sono per la maggior parte dell'anno zone non riscaldate, ma l'assunzione fatta è lecita.

L'involucro edilizio, si è supposto sia realizzato con materiali tipici di fine anni '90.

Il muro perimetrale esterno presenta un'intercapedine d'aria (spessore 5 cm) racchiusa tra uno strato di bimattoni (spessore 24 cm) e uno strato di forati (spessore 8 cm) e ovviamente l'intonaco interno da un lato e l'esterno dall'altro.

Sopra il solaio che divide il primo piano dal sottotetto, in entrambe le porzioni abitative, vi è steso uno strato di materiale isolante (spessore 5 cm). Ciò riduce le dispersioni ma allo stesso tempo, specialmente nel reparto notte a nord, rende la casa piuttosto fredda.

Per quanto riguarda le superfici vetrate, si è ipotizzato che siano già state sottoposte a ristrutturazione e quindi non siano caratterizzate da una singola lastra di vetro dello spessore di 4mm che comporterebbe una trasmittanza molto alta (circa $5 \text{ W/m}^2\text{K}$), ma da un vetro camera 4-6-4mm caratterizzato da una trasmittanza quasi dimezzata (nel nostro caso pari a $2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$). I telai sono considerati di Legno. Il numero di finestre e le loro caratteristiche sono considerate uguali per entrambe le unità.

Il generatore di calore considerato varia da caso a caso (vedi paragrafo successivo), ed è posto all'interno del garage, cioè nell'unico ambiente non riscaldato comunicante con l'abitazione.

4.3 Casi di studio

I casi di studio, gli stessi per ZONA E e ZONA F, sono stati eseguiti per lo più agendo sull'impianto o sull'involucro, cercando comunque di eseguire migliorie meno invasive possibili.

0. **Caso di riferimento:** Analisi tramite il software Ecodomus di una porzione di bifamiliare considerando l'involucro edilizio tal quale, senza cioè alcuna miglioria edilizia e con una caldaia a metano di vecchia generazione di cui si conoscono solamente i dati di targa riportati nel foglio "impianto";
1. **Caso 1:** Analisi tramite il software Ecodomus di una porzione di bifamiliare considerando l'involucro edilizio tal quale, senza cioè alcuna miglioria edilizia, ma andando a sostituire l'obsoleta caldaia a metano con una di nuova generazione

alimentata a Pellet, e andando ad inserire su ogni calorifero (considerati 11 nel caso) una valvola termostatica;

2. **Caso 2:** Analisi tramite il software Ecodomus di una porzione di bifamiliare dove si è migliorato l'involucro edilizio mediante l'applicazione di uno strato isolante in fibra di legno, senza però agire su l'impianto, il quale è rimasto quello del caso di riferimento, fatta eccezione per l'inserimento su ogni calorifero (considerati 11 nel caso) di una valvola termostatica;
3. **Caso 3:** Analisi tramite il software Ecodomus di una porzione di bifamiliare dove si è migliorato sia l'involucro edilizio, mediante l'applicazione di uno strato di isolante in fibra di legno, sia l'impianto, andando a sostituire la caldaia di vecchia generazione a metano, con una caldaia di nuova generazione alimentata a Pellet e andando ad inserire su ogni calorifero (considerati 11 nel caso) una valvola termostatica;
4. **Caso 4:** Analisi tramite il software Ecodomus di una porzione di bifamiliare dove si è migliorato sia l'involucro edilizio, mediante l'applicazione di uno strato isolante in fibra di legno, sia l'impianto, andando a sostituire la caldaia di vecchia generazione a metano, con una caldaia a condensazione, accoppiata a delle valvole termostatiche (1 per ogni termosifone, che nel caso specifico risultano essere 11) e abbinata ad un solare termico;
5. **Caso 5:** Analisi tramite il software Ecodomus di una porzione di bifamiliare dove si è provveduto a migliorare sia l'involucro edilizio, mediante l'applicazione di uno strato isolante in fibra di legno, sia l'impianto, andando a sostituire la caldaia di vecchia generazione a metano, con una pompa di calore, accoppiata a delle valvole termostatiche (1 per ogni termosifone, che nel caso specifico risultano essere 11) e abbinata ad un solare termico.

I sotto-paragrafi che seguono vanno a descrivere nel dettaglio gli interventi svolti.

Il Foglio "Risultati" del software Ecodomus riportato alla fine di ogni caso è riferito alla zona climatica E.

4.3.1 Caso 0: Caso di riferimento: Nessuna miglioria, ne edilizia ne impiantistica

La casa analizzata nel caso di riferimento non è altro che l'abitazione tal quale descritta nel paragrafo 4.1. Infatti non sono state apportate migliorie di nessun tipo, ne all'impianto ne all'involucro edilizio. Così facendo, è stato possibile, grazie all'utilizzo del software "Ecodomus", di ricavare i consumi di energia primaria, utili poi ad eseguire i confronti con i vari casi di studio. Si nota quindi che la casa risulta essere in *classe F*, con notevoli perdite verso l'esterno. La cosa ovviamente è più che plausibile dato che l'abitazione in questione ha tre lati totalmente comunicanti con l'esterno e un lato comunicante in parte col garage, unico ambiente non riscaldato, e in parte con l'esterno. Inoltre, come descritto anche nel paragrafo 4.2, i materiali utilizzati sono poco performanti.

Grazie all'utilizzo della vetro camera, le perdite dovute ai serramenti sono state contenute, anche se, dato che il valore è ancora migliorabile si potrebbe pensare ad una sostituzione o comunque un miglioramento dei telai esistenti.

I ponti termici sono piuttosto elevati, ma sono riducibili solamente andando ad agire sull'involucro edilizio, per cui il caso viene trattato nel paragrafo 4.3.2.

L'output fornito da Ecodomus è riportato nella pagine seguente.



2011 classe F

Ecodomus.vi
Certificazione Energetica

F

Dati identificativi dell'immobile

Indirizzo: Via Fornace 115, 36050 Bressanvido Vicenza
 dati catastali: Foglio: Particella/Sub:
 proprietario/committente: Bigarella Giovanni
 responsabile del calcolo:

Riscaldamento invernale e acqua calda sanitaria

Dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione	182,7 kWh/m ²	(a)
di cui per ventilazione	25,8 kWh/m ²	
Apporti gratuiti utili (η_v medio stagionale = 0,995)	-47,9 kWh/m ²	(b)
Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto degli apporti gratuiti	134,8 kWh/m ²	(c)=(a)+(b)
Perd. emissione ($\eta=0,92$), regolazione ($\eta=0,94$), distribuzione ($\eta=0,98$), accumulo	24,3 kWh/m ²	(d)
Fabbisogno termico lordo al generatore	159,1 kWh/m ²	(e)=(c)+(d)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(f)
Ausiliari e perdite di produzione	34,2 kWh/m ²	(g)
Fabbisogno di energia per riscaldamento	193,2 kWh/m ²	(h)=(e)+(f)+(g)
Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria	14,2 kWh/m ²	(1)
Perdite per accumulo	0,0 kWh/m ²	(2)
Altre perdite di impianto	21,7 kWh/m ²	(3)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(4)
Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria	35,9 kWh/m ²	(5)=(1)+(2)+(3)+(4)
Fabbisogno annuale di energia nel clima standard	229,1 kWh/m²	(h)+(5)
Fabbisogno annuale di energia nel clima reale	230,8 kWh/m²	



Produzione annuale di anidride carbonica nel clima standard

complessiva: 7939,6 kg/anno
 per unità di superficie: 45,77 kg/m²



Interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche

Per la classe	Descrizione sintetica	Fabbis. kWh/m ²	Costo €	Risp. €/anno	P.B. anni
A+					
A					
B+					
B					

Confronto con i requisiti limite

EPI nel clima reale (solo riscaldamento)	194,9 kWh/m ²
limite per interventi ex art. 3 c.1 l.a e c.2 l.a p.1 D.Lgs. 192/05	97,3 kWh/m ²
EPE, invol nel clima reale	12,8 kWh/m ²
limite D.P.R. 59/09 per interventi ex art.3 c.1 l.a, c.2 l.a p.1, 2 e l.b D.Lgs. 192/05	30,0 kWh/m ²

Trasmittanza media dell'involucro opaco	0,825 W/(m ² K)
Pareti opache disperdenti inclusi i ponti termici	0,958 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,34 W/(m ² K)
Coperture disperdenti	0,435 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,3 W/(m ² K)
Involucro finestrato inclusi i ponti termici	2,678 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	2,2 W/(m ² K)
Involucro verso ambienti riscaldati	n. pres. W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a, c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro disperdente degli ambienti non riscaldati	0,498 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a, c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro finestrato degli ambienti non riscaldati	n. pres. W/(m ² K)

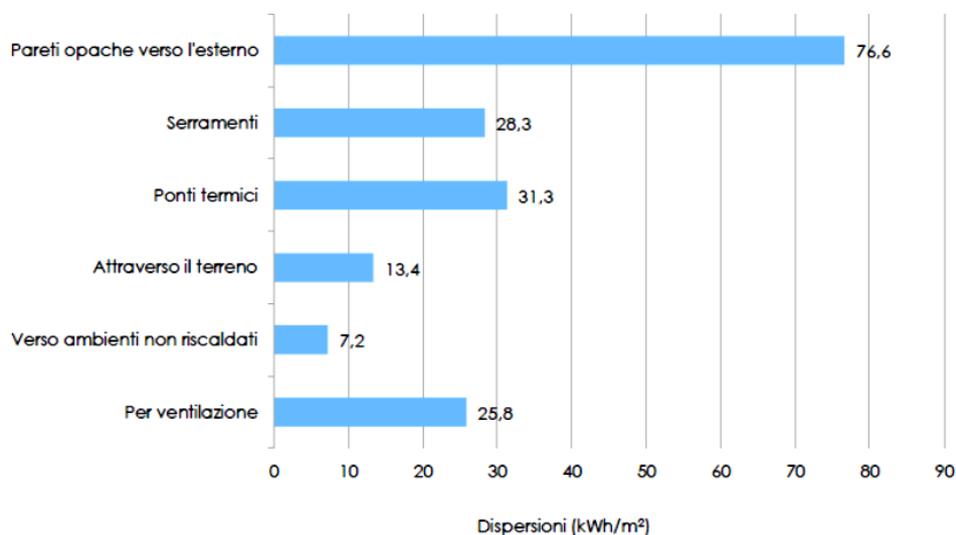
*e interventi ex art.4 c.8 D.P.R. 59/09

Rendimento globale medio stagionale di riscaldamento	69,8%
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.2 D.Lgs. 192/05 e art.4 c.5 D.P.R. 59/09	79,3%

Classificazione energetica nazionale

Classe prestazionale per riscaldamento	F
Classe prestazionale per ACS	G
Classe prestazionale globale	F
Qualità prestazionale estiva	II (prestazioni buone)

Ripartizione delle dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione



Parametri di valutazione del comportamento estivo

Costante di tempo delle partizioni opache	75,3 ore
valore minimo di qualità Ecodomus	96 ore
Surriscaldamento strutturale massimo	1,4 °C
valore massimo di qualità Ecodomus	2,0 °C



Fig. 4.2 Risultati Ecodomus Caso di riferimento

4.3.2 Caso 1: Caldaia a Pellet + Valvole Termostatiche

In questo caso, si è deciso di agire sulla porzione destra di bifamiliare, ma semplicemente a livello impiantistico, lasciando cioè l'involucro edilizio tal quale.

La caldaia di vecchia generazione è stata quindi sostituita con una caldaia a pellet prodotta dalla ditta Ungaro s.r.l. La caldaia in questione denominata "FIT E" ha una Potenza di 14kw, è collegabile a qualsiasi tipo di impianto di distribuzione esistente, installabile anche all'esterno se protetta dagli agenti atmosferici e dotata di diversi optional come ad esempio la doppia candeletta di accensione, il doppio cassetto ceneri e il sistema di pulizia facilitato. Tali fattori hanno fatto propendere a questo prodotto dato che si voleva realizzare una sostituzione il meno invasiva impossibile.

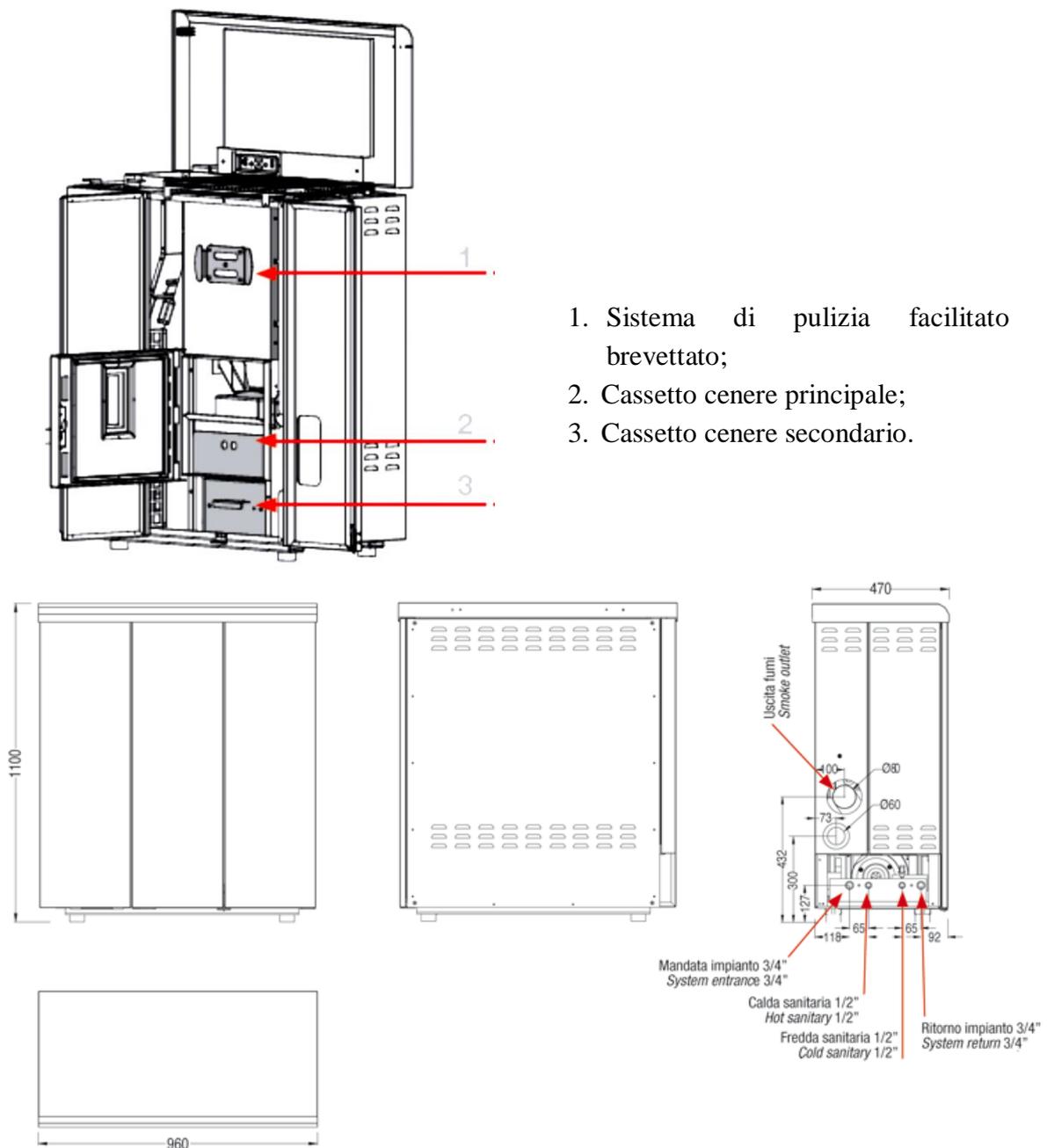


Fig. 4.3 Sezione caldaia

FIT E 24 kW			
Potenza nominale	Max	kW	24,5
	Min	kW	7,5
Rendimento all'acqua	Max	%	78,1
	Min	%	75,7
Rendimento di combustione	Max	%	91,0
	Min	%	95,0
Potenza all'acqua	Max	kW	21,0
	Min	kW	5,9
Capacità di serbatoio		l	50
Consumo orario pellet	Max	kg	5,6
	Min	kg	1,6
Autonomia di lavoro	Max	h	22
	Min	h	6
Superficie riscaldabile		m ³	500,0
Uscita scarico fumi pellet		ø mm	80,0
Tiraggio	Max	Pa	12,0
	Min	Pa	11,0
Entrata aria comburente pellet		ø mm	60,0
Prevalenza circolatore		m	5,0
Pressione di utilizzo a freddo		bar	0,8/1,2
Dimensione vaso di espansione		l	6,0
Produzione acqua calda sanitaria		lt/min	12,0
Tensione di alimentazione			220V - 50Hz
Assorbimento elettrico in fase di lavoro		Watt	150,0
Peso		kg	200

Tabella 11: *Dati tecnici caldaia FIT E*

Fonte: *Catalogo Ungaro s.r.l.*

Alla caldaia sovraesposta è stato abbinato anche un sistema di caricamento automatico composto da un box della ditta GEOplast, denominato nello specifico GEObox G4, con struttura in acciaio zincato e contenitore in tessuto flessibile in materiale plastico resistente ed antistatico. Il fondo del contenitore è anch'esso in acciaio per garantire una maggiore stabilità del silos stesso.

Il caricamento del silos avviene tramite bocchettoni di mandata ed aspirazione con possibilità di prolungamento, mentre per quanto riguarda lo svuotamento del silos, o meglio di alimentazione caldaia, è stata utilizzato un sistema a coclea flessibile.

Il riempimento può avvenire anche tramite autobotte (pressione di immissione massima 0,2 bar), cosa che, in caso di quantità rilevanti, può portare anche ad un risparmio in termini monetari. Contemporaneamente, durante questa operazione, la polvere viene aspirata da un apposito bocchettone di aspirazione.

È stata scelta questa specifica soluzione, non solo per aumentare l'autonomia di chi procede all'istallazione di una caldaia a pellet ed evitare le inevitabili problematiche legate al caricamento manuale, quali ad esempio polvere, spazio occupato da bancali, tempo sprecato ogni due giorni per caricare la caldaia; ma anche per la grande versatilità di istallazione che fornisce. Il suddetto box infatti, essendo regolabile in altezza, può essere adattato a qualsiasi tipo di locale, inoltre è accoppiabile a qualsiasi tipo di caldaia a pellet, in particolare, in quello scelto, il collegamento con il locale caldaia è realizzato a mezzo di un sistema a coclea montante.



Fig. 4.4 Sinistra: GEObox G4 Destra: Sistema di istallazione a coclea flessibile

Fonte: Geoplast

Le caratteristiche tecniche del GEObox G4 sono le seguenti:

- Telaio in acciaio regolabile in altezza
- Cono d'acciaio zincato;
- Silo in tessuto plastico antistatico;
- Bocchettone di riempimento e di aspirazione con possibilità di prolungamento (per riempimento al massimo 20m);
- Piastra scorrevole per consentire la manutenzione anche a serbatoio pieno;
- Piedini regolabili per poter posizionare correttamente la coclea.

GEObox G4				
Tipo nr.	Volume [m ³]	Q.tà Stoccabile [t]	Altezza [cm]	Misure [cm]
GEObox 12/G4	1,7 ÷ 2,6	1,1 ÷ 1,7	206 ÷ 278	120 x 120
GEObox 17/G4	3,1 ÷ 5,2	2,1 ÷ 3,2	206 ÷ 278	170 x 170
GEObox 21/G4	4,5 ÷ 7,5	2,8 ÷ 4,7	206 ÷ 278	210 x 210
GEObox 25/G4	6,4 ÷ 11,0	4,2 ÷ 6,7	218 ÷ 278	250 x 250
GEObox 29/G4	9,6 ÷ 14,1	6,0 ÷ 9,0	218 ÷ 278	290 x 290
GEObox 17/29/G4	5,7 ÷ 8,3	3,6 ÷ 5,4	218 ÷ 278	170 x 290
GEObox 21/29/G4	6,6 ÷ 10,2	3,8 ÷ 6,1	218 ÷ 278	210 x 290

Tabella 12: Dati tecnici del GEObox G4

Fonte: GEOplast

Per quanto riguarda i casi di studio in cui è stata installata una stufa a pellet, è sufficiente un GEObox 17/G4 a garantire il fabbisogno di pellet annuale (vedi Calcoli), in questo modo quindi sarà necessario effettuare un solo caricamento all'anno, con conseguente riduzione dei costi di approvvigionamento e delle inevitabili problematiche che si avrebbero con più caricamenti annuali. Il modello scelto inoltre garantisce un ingombro abbastanza limitato, o comunque non superiore a quello che si avrebbe accatastando il pellet in bancali (70 sacchi da 15kg).

Per l'installazione di tale sistema è necessario che il locale di stoccaggio confini con un muro esterno e sia di facile accesso per eventuali interventi di manutenzione oltre che essere permanentemente arieggiato; proprio per questo motivo, nel caso in esame, l'installazione è stata prevista nel locale adibito a garage.

I risultati ottenuti con Ecodomus hanno evidenziato il fatto che la casa rimane in classe F ma in compenso si riduce lievemente il fabbisogno termico lordo al generatore. Il fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria al contrario è più elevato, ciò è presumibilmente dovuto al fatto che ho perdite per accumulo (punto 2 file risultati), dato che ne è stato inserito uno da 300 litri, (paragrafo 4.2.6) che nella simulazione precedente non era presente. Inoltre, tutti i termosifoni, sono stati dotati di valvole termostatiche. Queste sono dei semplici dispositivi capaci di regolare un flusso grazie alla loro sensibilità alla variazione di temperatura. Se utilizzate, come nel nostro caso, nel circuito di riscaldamento, queste valvole sono in grado di modificare la posizione di apertura, passando ad una posizione di chiusura, all'aumentare della temperatura del fluido sopra una certa soglia, per aprirsi gradualmente con la diminuzione della temperatura sotto tale soglia, fino a permettere il passaggio completo del fluido giunto ad una temperatura ritenuta ottimale per l'impianto specifico. Le valvole termostatiche, che sono state conteggiate pari a 11, sono state integrate in ogni caso di studio.



2011 classe F

Ecodomus.vi
Certificazione Energetica

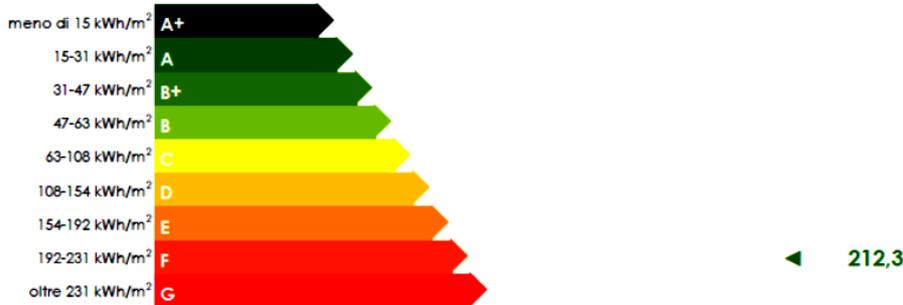
F

Dati identificativi dell'immobile

indirizzo: Via Fornace 115, 36050 Bressanvido Vicenza
 dati catastali: Foglio: Particella/Sub:
 proprietario/committente: Bigarella Giovanni
 responsabile del calcolo:

Riscaldamento invernale e acqua calda sanitaria

Dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione	182,7 kWh/m ²	(a)
di cui per ventilazione	25,8 kWh/m ²	
Apporti gratuiti utili (η_u , medio stagionale = 0,994)	-49,1 kWh/m ²	(b)
Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto degli apporti gratuiti	133,5 kWh/m ²	(c)=(a)+(b)
Perd. emissione ($\eta=0,92$), regolazione ($\eta=0,94$), distribuzione ($\eta=0,98$), accumulo	24,0 kWh/m ²	(d)
Fabbisogno termico lordo al generatore	157,6 kWh/m ²	(e)=(c)+(d)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(f)
Ausiliari e perdite di produzione	5,2 kWh/m ²	(g)
Fabbisogno di energia per riscaldamento	162,8 kWh/m ²	(h)=(e)+(f)+(g)
Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria	14,2 kWh/m ²	(1)
Perdite per accumulo	3,4 kWh/m ²	(2)
Altre perdite di impianto	31,9 kWh/m ²	(3)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(4)
Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria	49,5 kWh/m ²	(5)=(1)+(2)+(3)+(4)
Fabbisogno annuale di energia nel clima standard	212,3 kWh/m²	(h)+(5)
Fabbisogno annuale di energia nel clima reale	213,8 kWh/m²	



Produzione annuale di anidride carbonica nel clima standard

complessiva: 7356,6 kg/anno
 per unità di superficie: 42,41 kg/m²



Interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche

Per la classe	Descrizione sintetica	Fabbis. kWh/m ²	Costo €	Risp. €/anno	P.B. anni
A+					
A					
B+					
B					

Confronto con i requisiti limite

EPI nel clima reale (solo riscaldamento)	164,3 kWh/m ²
limite per interventi ex art. 3 c.1 l.a e c.2 l.a p.1 D.Lgs. 192/05	97,3 kWh/m ²
EPE, invol nel clima reale	12,8 kWh/m ²
limite D.P.R. 59/09 per interventi ex art.3 c.1 l.a, c.2 l.a p.1, 2 e l.b D.Lgs. 192/05	30,0 kWh/m ²

Trasmittanza media dell'involucro opaco	0,825 W/(m ² K)
Pareti opache disperdenti inclusi i ponti termici	0,958 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,34 W/(m ² K)
Coperture disperdenti	0,435 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,3 W/(m ² K)
Involucro finestrato inclusi i ponti termici	2,678 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	2,2 W/(m ² K)
Involucro verso ambienti riscaldati	n. pres. W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a, c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro disperdente degli ambienti non riscaldati	0,498 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a, c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro finestrato degli ambienti non riscaldati	n. pres. W/(m ² K)

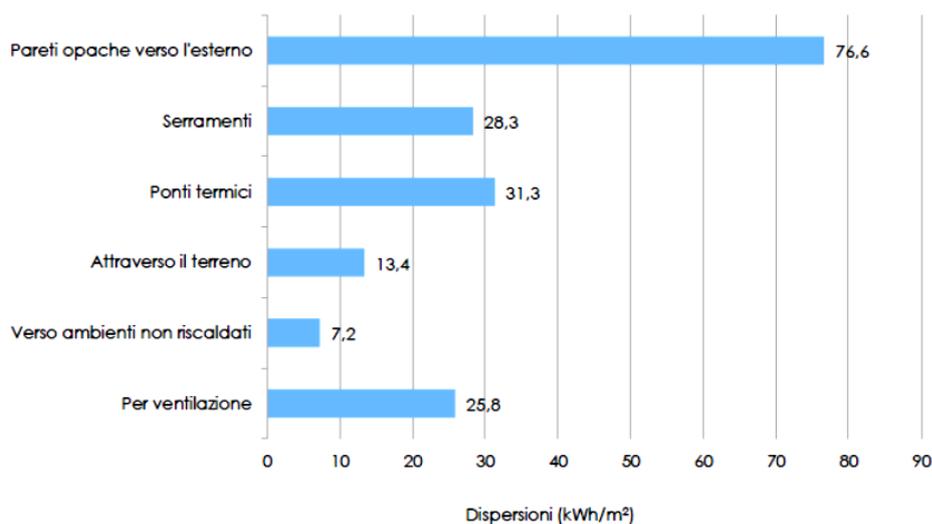
*e interventi ex art.4 c.8 D.P.R. 59/09

Rendimento globale medio stagionale di riscaldamento	82,0%
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.2 D.Lgs. 192/05 e art.4 c.5 D.P.R. 59/09	79,2%

Classificazione energetica nazionale

Classe prestazionale per riscaldamento	E
Classe prestazionale per ACS	G
Classe prestazionale globale	F
Qualità prestazionale estiva	II (prestazioni buone)

Ripartizione delle dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione



Parametri di valutazione del comportamento estivo

Costante di tempo delle partizioni opache	75,3 ore
valore minimo di qualità Ecodomus	96 ore
Surriscaldamento strutturale massimo	1,4 °C
valore massimo di qualità Ecodomus	2,0 °C



Fig. 4.5 Risultati Ecodomus Caso 1, Zona E

4.3.3 Caso 2: Isolamento termico + Valvole Termostatiche

In questo caso di studio i miglioramenti si sono concentrati sull'edilizia; è stato cioè mantenuto l'impianto con caldaia a metano considerato nel caso di riferimento concentrando gli interventi sull'involucro edilizio andando a rivestire con uno strato di isolante in fibra di legno (Vedi par. 2.8.1) quelle pareti più disperdenti.

Le pareti che sono state isolate sono quindi:

➤ **Muro esterno:**

L'isolamento è stato eseguito sul lato esterno della parete, in modo tale da non perdere volumi all'interno dell'abitazione, rendere le modalità di intervento meno complesse e garantire oltre a tempi di conclusione più contenuti anche una miglior resa energetica.

Per questa operazione è stato scelto il pannello PAVAWALL della ditta PAVATEX.

Il suddetto pannello in fibra di legno è stato proprio pensato per il cappotto esterno di costruzioni in muratura.



È infatti caratterizzato da:

- Ottima intonacabilità con diversi prodotti in commercio;
- Valido coibente termoacustico, protegge dal calore estivo;
- Buona assorbenza e permeabilità al vapore per un clima abitativo confortevole;
- Alta possibilità di spessori a seconda delle esigenze: 60 / 80 / 100 / 120 / 140 / 160 mm. In questo caso è stato scelto uno spessore pari a 120mm;
- Conduttività termica λ_D : 0,040 W/(mK);
- Densità ρ : 150 kg/m³;

➤ **Muro abitazione/garage:**

L'isolamento in questo caso è stato eseguito sul lato interno del lato abitato, ciò a reso necessario l'utilizzo di un pannello diverso dal precedente dato che i fenomeni a cui è sottoposto non sono gli stessi. Anche qui è stato scelto un pannello in fibra di legno della ditta PAVATEX denominato PAVADENTRO. È un pannello pensato proprio per il cappotto interno delle pareti perimetrali.



Garantisce:

- Efficace protezione termica per edifici con facciate sotto conservazione architettonica;
- Ottima intonacabilità con intonaci d'argilla e calce con conducibilità capillare;
- Vasta gamma di spessori: 40 / 60 / 80 / 100 mm. In questa simulazione è stato considerato un pannello di spessore 80mm;
- Conduttività termica λ_D : 0,044 W/(mK);
- Densità ρ : 180 kg/m³;

➤ **Solaio:**

Dato che la simulazione in Ecodomus mostrava perdite ancora piuttosto rilevanti verso l'esterno si è scelto di isolare anche questa componente opaca nonostante fosse già presente uno strato di isolante di 50mm. Evidentemente tale isolante mostrava caratteristiche non sufficienti a risolvere almeno parte del problema della dispersione verso l'esterno per cui, dato che il sottotetto della casa in considerazione risulta agibile senza problemi si è ipotizzato di aggiungere un ulteriore strato di isolante in fibra di legno, sempre della ditta PAVATEX, denominato PAVATHERM; ideale per coibentare tetti e solai.



Questo tipo di pannello presenta:

- Ottima protezione a freddo e rumore;
- Protezione dal calore estivo grazie all'elevato grado di accumulazione termica;
- Ottima assorbenza e permeabilità al vapore per un clima abitativo confortevole;
- 100% legno di conifere naturale (abete rosso nello specifico), non trattato;
- Vasta gamma di spessori: 30 / 40 / 60 / 80 / 100 / 120 mm. In questa simulazione è stato considerato un pannello di spessore 100 mm;
- Conduttività termica λ_D : 0,038 W/(mK);
- Densità ρ : 140 kg/m³.

Grazie all'involucro edilizio si è riusciti ad ottenere un miglioramento di ben due classi mostrando una netta riduzione del fabbisogno termico lordo al generatore.

Il fabbisogno termico per l'ACS invece rimane lo stesso del primo caso dato che non è stato effettuato alcun intervento sull'impianto.

I risultati della simulazione sono riportati nelle pagine seguenti.



2011 classe
Ecodomus.vi
Certificazione Energetica

D

Dati identificativi dell'immobile

indirizzo Via Fornace 115, 36050 Bressanvido Vicenza
 dati catastali Foglio: Particella/Sub:
 proprietario/committente Bigarella Giovanni
 responsabile del calcolo

Riscaldamento invernale e acqua calda sanitaria

Dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione	120,3 kWh/m ²	(a)
di cui per ventilazione	25,8 kWh/m ²	
Apporti gratuiti utili (η_u medio stagionale = 0,984)	-43,9 kWh/m ²	(b)
Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto degli apporti gratuiti	76,4 kWh/m ²	(c)=(a)+(b)
Perd. emissione ($\eta=0,94$), regolazione ($\eta=0,94$), distribuzione ($\eta=0,98$), accumulo	11,8 kWh/m ²	(d)
Fabbisogno termico lordo al generatore	88,2 kWh/m ²	(e)=(c)+(d)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(f)
Ausiliari e perdite di produzione	26,7 kWh/m ²	(g)
Fabbisogno di energia per riscaldamento	115,0 kWh/m ²	(h)=(e)+(f)+(g)
Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria	14,2 kWh/m ²	(1)
Perdite per accumulo	0,0 kWh/m ²	(2)
Altre perdite di impianto	21,7 kWh/m ²	(3)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(4)
Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria	35,9 kWh/m ²	(5)=(1)+(2)+(3)+(4)
Fabbisogno annuale di energia nel clima standard	150,9 kWh/m²	(h)+(5)
Fabbisogno annuale di energia nel clima reale	151,9 kWh/m²	



Produzione annuale di anidride carbonica nel clima standard

complessiva 5227,8 kg/anno
 per unità di superficie 30,14 kg/m²



Interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche

Per la classe	Descrizione sintetica	Fabbis. kWh/m ²	Costo €	Risp. €/anno	P.B. anni
A+					
A					
B+					
B					

Confronto con i requisiti limite

EPI nel clima reale (solo riscaldamento)	116,0 kWh/m ²
limite per interventi ex art. 3 c.1 l.a e c.2 l.a p.1 D.Lgs. 192/05	97,3 kWh/m ²
EPE, invol nel clima reale	18,7 kWh/m ²
limite D.P.R. 59/09 per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a p.1, 2 e l.b D.Lgs. 192/05	30,0 kWh/m ²

Trasmittanza media dell'involucro opaco	0,420 W/(m ² K)
Pareti opache disperdenti inclusi i ponti termici	0,503 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,34 W/(m ² K)
Coperture disperdenti	0,203 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,3 W/(m ² K)
Involucro finestrato inclusi i ponti termici	2,678 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	2,2 W/(m ² K)
Involucro verso ambienti riscaldati	n. pres. W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro disperdente degli ambienti non riscaldati	0,264 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro finestrato degli ambienti non riscaldati	n. pres. W/(m ² K)

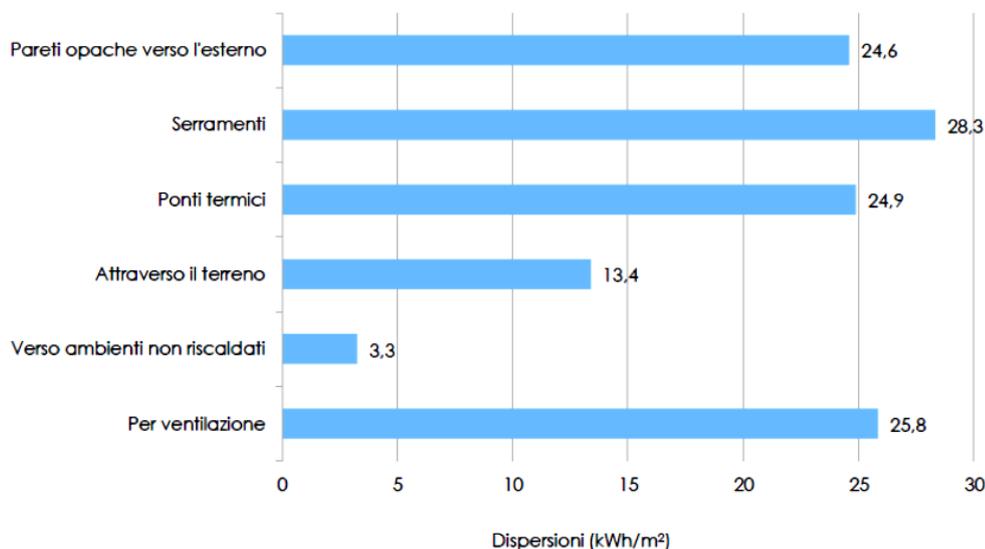
*e interventi ex art.4 c.8 D.P.R. 59/09

Rendimento globale medio stagionale di riscaldamento	66,6%
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.2 D.Lgs. 192/05 e art.4 c.5 D.P.R. 59/09	79,3%

Classificazione energetica nazionale

Classe prestazionale per riscaldamento	D
Classe prestazionale per ACS	G
Classe prestazionale globale	E
Qualità prestazionale estiva	II (prestazioni buone)

Ripartizione delle dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione



Parametri di valutazione del comportamento estivo

Costante di tempo delle partizioni opache	94,5 ore
valore minimo di qualità Ecodomus	96 ore
Surriscaldamento strutturale massimo	1,6 °C
valore massimo di qualità Ecodomus	2,0 °C



Fig. 4.6 Risultati Ecodomus Caso 2, Zona E

4.3.4 Caso 3: Caldaia a pellet + Isolamento termico + Valvole Termostatiche

Questa simulazione non è altro che il caso precedente con in più le migliorie impiantistiche riportate nel Caso 1 (paragrafo 4.2.2). È inutile quindi riportare le caratteristiche della caldaia considerata o dei pannelli isolanti utilizzati dato che sono stati descritti nei paragrafi precedenti.

Ci si limita quindi a riportare i risultati forniti dal programma di calcolo.

I miglioramenti rispetto al caso precedente sono piuttosto ridotti; infatti il fabbisogno termico lordo è diminuito di poco, mentre il fabbisogno di energia per l'acqua calda sanitaria è maggiore a causa dell'accumulo di 300litri che nel caso 2 non era presente. Ciò ha portato, come nel caso 1, a perdite per accumulo che prima non si verificavano.

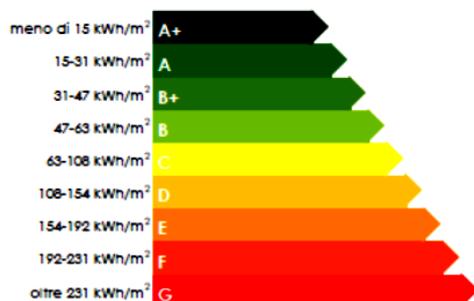


Dati identificativi dell'immobile

indirizzo Via Fornace 115, 36050 Bressanvido Vicenza
dati catastali Foglio: Particella/Sub:
proprietario/committente Bigarella Giovanni
responsabile del calcolo

Riscaldamento invernale e acqua calda sanitaria

Dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione	120,3 kWh/m ²	(a)
di cui per ventilazione	25,8 kWh/m ²	
Apporti gratuiti utili (η _g medio stagionale = 0,983)	-44,9 kWh/m ²	(b)
Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto degli apporti gratuiti	75,4 kWh/m ²	(c)=(a)+(b)
Perd. emissione (η=0,94), regolazione (η=0,94), distribuzione (η=0,98), accumulo	11,7 kWh/m ²	(d)
Fabbisogno termico lordo al generatore	87,0 kWh/m ²	(e)=(c)+(d)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(f)
Ausiliari e perdite di produzione	3,5 kWh/m ²	(g)
Fabbisogno di energia per riscaldamento	90,5 kWh/m ²	(h)=(e)+(f)+(g)
Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria	14,2 kWh/m ²	(1)
Perdite per accumulo	3,4 kWh/m ²	(2)
Altre perdite di impianto	32,0 kWh/m ²	(3)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(4)
Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria	49,6 kWh/m ²	(5)=(1)+(2)+(3)+(4)
Fabbisogno annuale di energia nel clima standard	140,2 kWh/m ²	(h)+(5)
Fabbisogno annuale di energia nel clima reale	141,1 kWh/m ²	



◀ 140,2

Produzione annuale di anidride carbonica nel clima standard

complessiva 1758,2 kg/anno
per unità di superficie 10,14 kg/m²



Interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche

Per la classe	Descrizione sintetica	Fabbis. kWh/m ²	Costo €	Risp. €/anno	P.B. anni
A+					
A					
B+					
B					

Confronto con i requisiti limite

EPI nel clima reale (solo riscaldamento)	91,6 kWh/m ²
limite per interventi ex art. 3 c.1 l.a e c.2 l.a p.1 D.Lgs. 192/05	97,3 kWh/m ²
EPE, invol nel clima reale	18,7 kWh/m ²
limite D.P.R. 59/09 per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a p.1, 2 e l.b D.Lgs. 192/05	30,0 kWh/m ²

Trasmittanza media dell'involucro opaco	0,420 W/(m ² K)
Pareti opache disperdenti inclusi i ponti termici	0,503 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,34 W/(m ² K)
Coperture disperdenti	0,203 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,3 W/(m ² K)
Involucro finestrato inclusi i ponti termici	2,678 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	2,2 W/(m ² K)
Involucro verso ambienti riscaldati	n. pres. W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro disperdente degli ambienti non riscaldati	0,264 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro finestrato degli ambienti non riscaldati	n. pres. W/(m ² K)

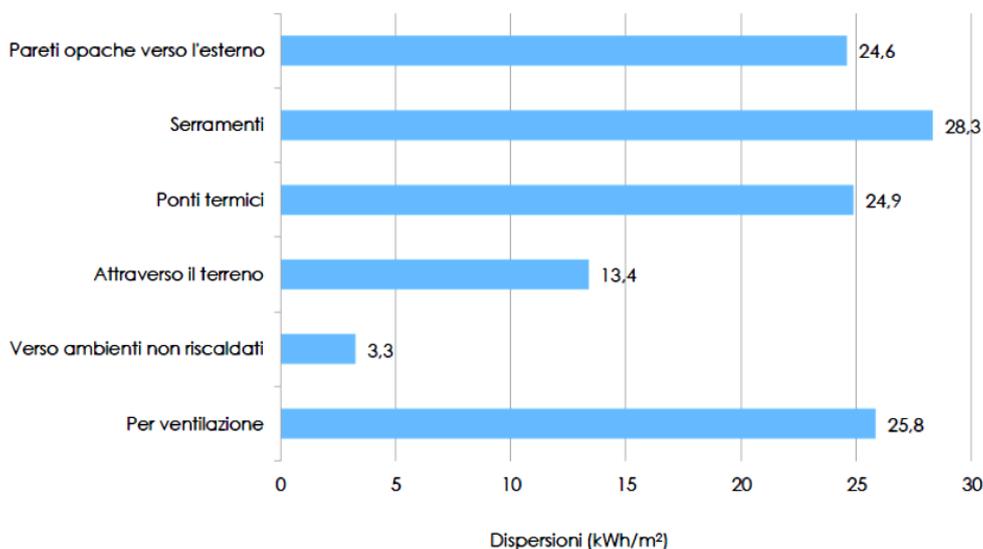
*e interventi ex art.4 c.8 D.P.R. 59/09

Rendimento globale medio stagionale di riscaldamento	83,1%
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.2 D.Lgs. 192/05 e art.4 c.5 D.P.R. 59/09	78,4%

Classificazione energetica nazionale

Classe prestazionale per riscaldamento	C
Classe prestazionale per ACS	G
Classe prestazionale globale	D
Qualità prestazionale estiva	II (prestazioni buone)

Ripartizione delle dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione



Parametri di valutazione del comportamento estivo

Costante di tempo delle partizioni opache	94,5 ore
valore minimo di qualità Ecodomus	96 ore
Surriscaldamento strutturale massimo	1,6 °C
valore massimo di qualità Ecodomus	2,0 °C

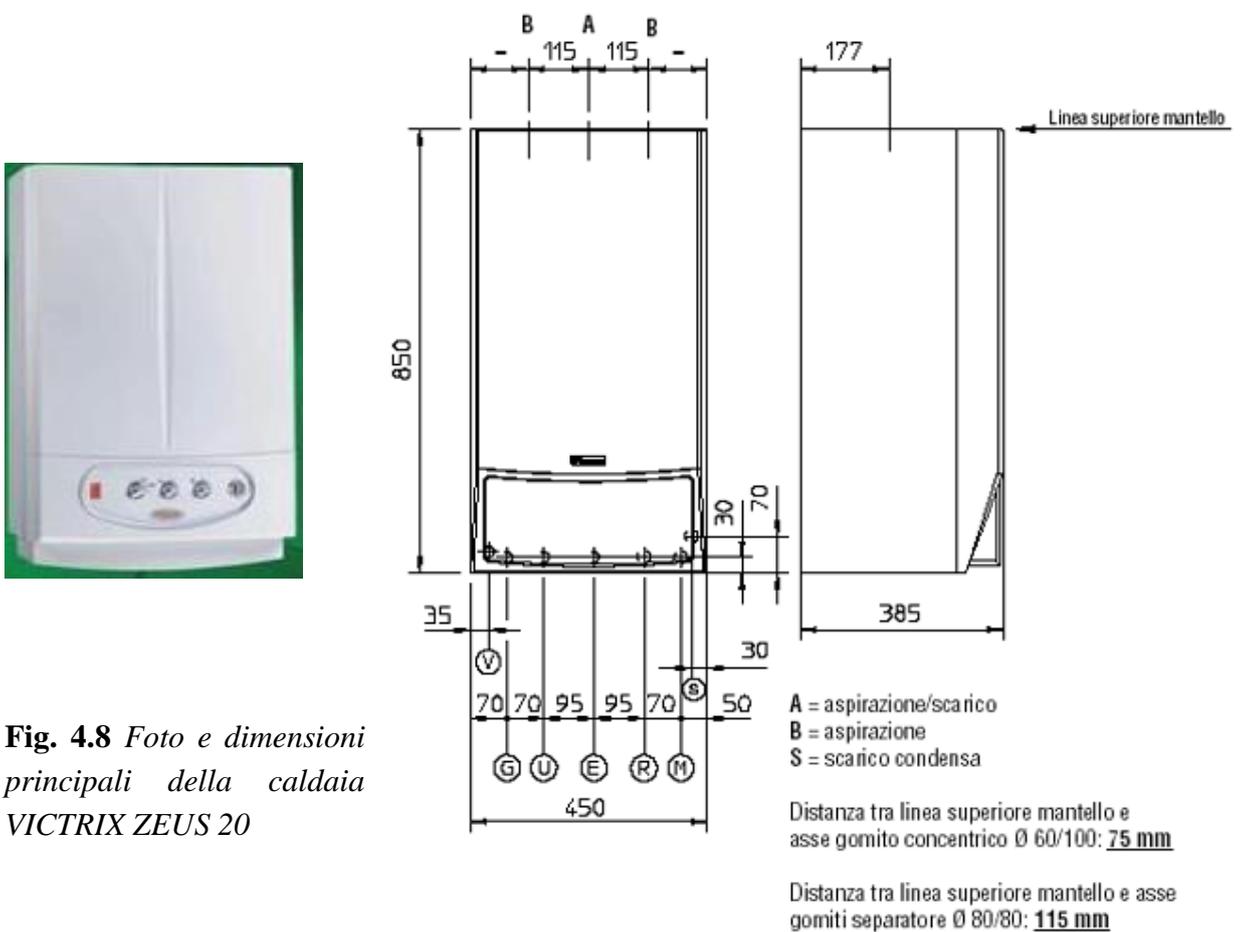


Fig. 4.7 Risultati Ecodomus Caso 3, Zona E

4.3.5 Caso 4: Isolamento termico + Caldaia a condensazione + Valvole termostatiche + Solare termico

Qui le migliorie sono state molteplici. Per quanto riguarda l'involucro edilizio, gli interventi sono stati i medesimi del caso 2, paragrafo 4.2.3, per cui non verranno riportati nuovamente.

Per quanto riguarda l'impianto invece gli interventi sono stati piuttosto sostanziali. La vecchia caldaia a metano è stata sostituita con una nuovissima caldaia a condensazione della ditta IMMERGAS, denominata VICTRIX ZEUS 20.



Le caratteristiche tecniche sono riportate di seguito.

CALDAIA VICTRIX ZEUS 20			
Potenza termica	[kW]	nom.	24
		min.	5
Potenza utile	[kW]	nom.	23,5
		min.	4,7
$\eta_{100\%}$			98
$\eta_{30\%}$			97
Assorbimento nominale			128
Perdite al camino con bruciatore on	[%]	nom.	1,5
		min.	3
Perdite al mantello con bruciatore on	[%]	nom.	0,5
		min.	4
Perdite al camino con bruciatore off	[%]		0,02
Perdite al mantello con bruciatore off	[%]		0,91
Temperatura fumi	[°C]	nom.	43
		min.	38
Portata fumi	[kg/h]	nom.	39
		min.	8
CO	[mg/kWh]	nom.	95
		min.	5
CO ₂	[kg/h]	nom.	9,2
		min.	9
NO _x	[mg/kWh]	nom.	64
		min.	21

Tabella 13: Dati tecnici Caldaia VICTRIX ZEUS 20

Fonte: Immergas

Oltre a ciò l'impianto è stato integrato con valvole termostatiche, già descritte nel paragrafo 4.2.2, e pannelli solari termici a cui ovviamente è abbinato un accumulatore, sempre di 300 litri descritto nel paragrafo 4.2.6.

Per la scelta della superficie captante si sono seguiti i principi base di dimensionamento. Questi vengono distinti in due casi a seconda del livello di integrazione, dopo di che i metri quadri che si andranno ad installare dipendono anche dal tipo di pannello che viene scelto.

L'impianto solare termico può quindi essere utilizzato come integrazione per:

➤ **Acqua calda sanitaria:**

Superficie collettore:

- Collettore *Piano*: $0,7 \div 1 \text{ m}^2$ per persona;
- Collettore *Sottovuoto*: $0,5 \div 0,8 \text{ m}^2$ per persona.

Accumulo: $70 \div 100$ litri per ogni m^2 di collettore installato.

➤ **Acqua calda sanitaria e riscaldamento ambiente:**

(sistemi con copertura fino al 35% del fabbisogno per il riscaldamento ambiente)

Superficie collettore:

- Collettore *Piano*: $0,7 \div 1 \text{ m}^2$ di superficie captante ogni 10 m^2 di abitazione;
- Collettore *Sottovuoto*: $0,5 \div 0,8 \text{ m}^2$ di superficie captante ogni 10 m^2 di abitazione.

Accumulo:

- 50 litri per ogni m^2 di collettore installato;
- 100 200 litri per kW di carico termico.

In questo caso di studio si è considerata una integrazione con pannello solare termico solo a livello di acqua calda sanitaria. È stato scelto un pregiato collettore solare PIANO con una vasca stampata senza saldature, della ditta CONSOLAR denominato nello specifico PLANO 26. La luce solare che cade sull'assorbitore viene trasformata in calore e trasportata nel bollitore tramite i tubi di rame e il liquido solare. Il vetro solare trasparente garantisce un alto passaggio di luce solare costante nel collettore. È utilizzabile in impianti solari per la produzione di acqua calda e il riscaldamento integrativo, per nuove costruzioni o ristrutturazioni con montaggio sul tetto, su tetto piano, in molti casi anche con montaggio ad incasso ed è abbinabile a diversi tipi di bollitori.

La scelta è ricaduta su questo tipo di collettore per i vantaggi che fornisce, infatti garantisce:

- *Particolare durata e prestazioni costanti*;
- *Economicità*: rendimenti solari sempre alti e buon rapporto prezzo/prestazioni: questo è dovuto a due motivi:
 - La vasca del collettore di alluminio garantisce prestazioni stabili rispetto a collettori rivettati o incollati anche dopo tanti anni di funzionamento. In questo modo è garantito anche un alto risparmio di energia ogni anno;
 - L'isolamento termico particolarmente spesso da 60mm riduce le perdite di calore sul lato posteriore del collettore. Presenta in tal modo una buona resa anche nelle giornate nuvolose delle stagioni intermedie e nelle giornate invernali.

- *Un buon comportamento della stagnazione* , grazie alla moderna tubazione del collettore: grazie al fascio tubiero ad arpa, quando il collettore d'estate diventa molto caldo, il liquido solare ne viene espulso rapidamente e completamente. In questo modo l'antigelo deve essere controllato o sostituito molto meno frequentemente rispetto alla tubazione tradizionale di altri collettori. Ne consegue una maggior durata dell'impianto solare.
- *Un design elegante*: la vasca del collettore non è solo un elemento di design, ma protegge anche dagli influssi atmosferici esterni. I collettori sul tetto hanno un aspetto elegante grazie al bordo ribassato e possono essere integrati in vari tipi di casi.
- *Montaggio veloce e semplice*: per il montaggio in verticale o in orizzontale sono disponibili versioni di collettori speciali. Nell'installazione dei collettori il montaggio può essere eseguito sul tetto (parallelo/20°/45°), su tetto piano, in tanti casi anche ad incasso.

Oltre ciò i materiali utilizzati sono selezionati in base all'affidabilità testata e vengono lavorati in una qualità di serie standardizzata, ma soprattutto il rivestimento selettivo usato viene applicato con procedimento ecologico e consente rendimenti di calore particolarmente alti grazie alla sua efficacia.

Altro motivo che ha motivato la scelta del suddetto pannello è dovuto al fatto che ha conseguito il marchio ecologico RAUL-UZ 73 e ha ottenuto la certificazione DIN.

Dato che è stato scelto un collettore piano e che gli abitanti dell'abitazione sono tre sono stati inseriti 2 pannelli PLANO 26 per una superficie di apertura pari a 4,66 m² e un accumulo di 300 litri. La superficie captante è sovradimensionata rispetto l'effettiva esigenza ma la scelta è risultata obbligata per utilizzare il pannello finora descritto.

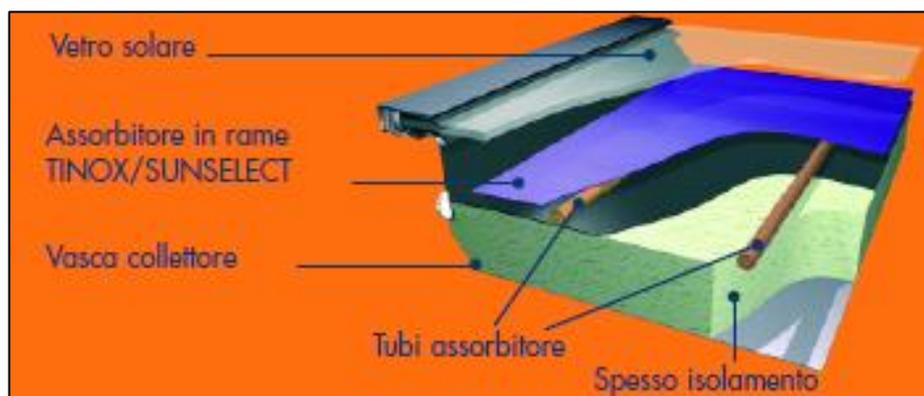


Fig. 4.9 Sezione pannello PLANO 26

Di seguito sono riportate le caratteristiche tecnico del pannello PLANO 26.

PLANO 26	
Collettore:	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensioni: Lunghezza = 2179 mm; Larghezza = 1169 mm; Profondità = 107 mm; • Peso: 42 kg; • Superficie lorda: 2,55 m²; • Superficie di apertura: 2,33 m²; • Superficie assorbitore: 2,26 m².
Rendimento: Misurazione secondo EN12975 – 2 dell'ITW Stoccarda	<ul style="list-style-type: none"> • Riferiti alla superficie di apertura; • $\eta_0 = 78,3\%$; • Coeff. lineare: $a_1 = 3,018$ W/(m²K); • Coeff. quadratico: $a_2 = 0,013$ W/(m²K); • Fattore di correzione dell'angolo di irraggiamento (50°): 0,95; • Temperatura di arresto: $\approx 217^\circ$.
Assorbitore:	Di rame a superficie piena Tinox/Sunselect.
Vetro:	Vetro di sicurezza solare 3,2 mm AFT Solatex strutturato.
Impianto idraulico:	Ad Arpa/Fascio tubiero a meandro
Scatola:	<ul style="list-style-type: none"> • Vasca di alluminio chiusa; • Telaio in alluminio; • Guarnizione EPDM continua.
Isolamento:	Lana di roccia ecologica: 60 mm.
Tipo di montaggio:	Verticale
Test di qualità:	<ul style="list-style-type: none"> • Prova secondo EN12975 – 2 dell'ITW Stoccarda, certificato di prova N. 03COL335; • Marchio ecologico: RAL – UZ – 73.
Garanzia Consolar:	10 anni.

Tabella 14: Caratteristiche tecniche del Pannello solare PLANO 26

Fonte: Consolar



2011

Ecodomus.vi
Certificazione Energetica

classe



Dati identificativi dell'immobile

Indirizzo: Via Fornace 115, 36050 Bressanvido Vicenza
 dati catastali: Foglio: Particella/Sub:
 proprietario/committente: Bigarella Giovanni
 responsabile del calcolo:

Riscaldamento invernale e acqua calda sanitaria

Dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione	120,3 kWh/m ²	(a)
di cui per ventilazione	25,8 kWh/m ²	
Apporti gratuiti utili (η _v medio stagionale = 0,983)	-44,9 kWh/m ²	(b)
Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto degli apporti gratuiti	75,4 kWh/m ²	(c)=(a)+(b)
Perd. emissione (η=0,94), regolazione (η=0,94), distribuzione (η=0,98), accumulo	11,7 kWh/m ²	(d)
Fabbisogno termico lordo al generatore	87,0 kWh/m ²	(e)=(c)+(d)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(f)
Ausiliari e perdite di produzione	10,3 kWh/m ²	(g)
Fabbisogno di energia per riscaldamento	97,3 kWh/m ²	(h)=(e)+(f)+(g)
Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria	14,2 kWh/m ²	(1)
Perdite per accumulo	3,4 kWh/m ²	(2)
Altre perdite di impianto	5,6 kWh/m ²	(3)
Contributo collettori solari	-22,3 kWh/m ²	(4)
Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria	0,9 kWh/m ²	(5)=(1)+(2)+(3)+(4)
Fabbisogno annuale di energia nel clima standard	98,2 kWh/m²	(h)+(5)
Fabbisogno annuale di energia nel clima reale	99,2 kWh/m²	



Produzione annuale di anidride carbonica nel clima standard

complessiva: 3401,2 kg/anno
 per unità di superficie: 19,61 kg/m²



Interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche

Per la classe	Descrizione sintetica	Fabbis. kWh/m ²	Costo €	Risp. €/anno	P.B. anni
A+					
A					
B+					
B					

Confronto con i requisiti limite

EPI nel clima reale (solo riscaldamento)	98,3 kWh/m²
limite per interventi ex art. 3 c.1 l.a e c.2 l.a p.1 D.Lgs. 192/05	97,3 kWh/m ²
EPE, invol nel clima reale	18,7 kWh/m ²
limite D.P.R. 59/09 per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a p.1, 2 e l.b D.Lgs. 192/05	30,0 kWh/m ²

Trasmittanza media dell'involucro opaco	0,420 W/(m ² K)
Pareti opache disperdenti inclusi i ponti termici	0,503 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,34 W/(m ² K)
Coperture disperdenti	0,203 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,3 W/(m ² K)
Involucro finestrato inclusi i ponti termici	2,678 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	2,2 W/(m ² K)
Involucro verso ambienti riscaldati	n. pres. W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro disperdente degli ambienti non riscaldati	0,264 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro finestrato degli ambienti non riscaldati	n. pres. W/(m ² K)

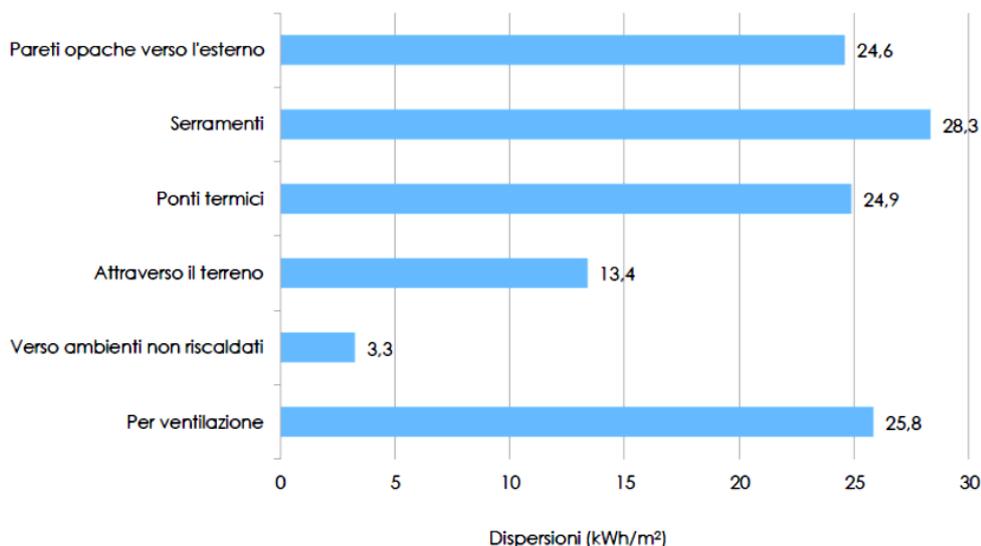
*e interventi ex art.4 c.8 D.P.R. 59/09

Rendimento globale medio stagionale di riscaldamento	77,5%
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.2 D.Lgs. 192/05 e art.4 c.5 D.P.R. 59/09	79,1%

Classificazione energetica nazionale

Classe prestazionale per riscaldamento	D
Classe prestazionale per ACS	A
Classe prestazionale globale	C
Qualità prestazionale estiva	II (prestazioni buone)

Ripartizione delle dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione



Parametri di valutazione del comportamento estivo

Costante di tempo delle partizioni opache	94,5 ore
valore minimo di qualità Ecodomus	96 ore
Surriscaldamento strutturale massimo	1,6 °C
valore massimo di qualità Ecodomus	2,0 °C



Fig. 4.10 Risultati Ecodomus Caso 4, Zona E

4.3.6 Caso 5: Isolamento termico + Pompa di calore + Valvole termostatiche + Solare termico

Questo caso è molto simile a quello trattato in precedenza, fatta eccezione per il generatore di calore, infatti non si tratta più di una caldaia a condensazione, bensì di una pompa di calore. Per quanto riguarda gli altri componenti di impianto, sono gli stessi considerati nel paragrafo 4.2.5 per cui non verranno descritti nuovamente.

La pompa di calore presa in considerazione è commercializzata dalla ditta ROTEX e nello specifico è denominata HPSUhitemp (dove HSPU sta per Heat Pump Solar Unit).

È stata scelta principalmente per due motivi: perché è nata per la ristrutturazione e perché può essere abbinata all'impianto solare.

Oltre ciò, la HPSUhitemp essendo una pompa di calore ad alta temperatura che sfrutta l'aria esterna riscaldata dal sole con la massima efficienza ottenendo temperature di mandata fino a 80°C, permette di sostituire una caldaia esistente senza rinunciare al comfort di una casa calda. I radiatori esistenti vengono semplicemente integrati nel nuovo sistema di riscaldamento. Grazie alla compattezza di ogni singolo componente (unità interna, unità esterna, accumulatore) non è necessaria una centrale termica separata per alloggiare il tutto, rendendo l'operazione meno invasiva, cosa che si è cercato di ottenere in tutti i casi trattati.

Tutte le pompe di calore ROTEX utilizzano la cosiddetta tecnologia inverter, che fa lavorare il compressore in modo variabile fra il 50 e il 100% di potenza, per cui la prestazione viene continuamente adattata al fabbisogno termico, ottenendo un'elevata efficienza energetica e un funzionamento estremamente silenzioso.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche della pompa considerata:

HPSUhitemp			
		Unità interna	Unità esterna
DATI PRESTAZIONALI			
Potenza riscaldante	[kW]	11	11
Assorbimento elettrico	[kW]	3,57	-
COP		2,6	-
DIMENSIONI			
Larghezza	[mm]	900	600
Altezza	[mm]	1345	705
Profondità	[mm]	320	695
PESO			
Peso Netto	[kg]	120	144
Peso Lordo	[kg]	130	153
COMPRESSORE			
Tipo di motore		Scroll totalmente ermetico	
CAMPO DI FUNZIONAMENTO			
Riscaldamento	[°C]	-20 fino a +20°C	-20 fino a +20°C
Produzione di ACS	[°C]	-20 fino a +35°C	-20 fino a +35°C
Mandata massima	[°C]		80
Mandata minima	[°C]		25
Temperatura massima ACS	[°C]		80
Temperatura minima ACS	[°C]		25
MEZZO REFRIGERANTE			
Tipo		R410a	R410a e R134a
Sbrinamento		Inversione processo	
Regolazione potenza		controllo inverter	
Frequenza	[Hz]	50	50
Tensione	[V]	220-240	220-240
POMPA			
ESP nominale	[kPa]		94
Assorbimento elettrico	[W]		87
PORTATA D'ACQUA			
Portata nominale	[l/min]		15,8

Tabella 15: Dati tecnici della pompa di calore HPSUhitemp

Fonte: Rotex



Fig. 4.11: *Componenti della pompa di calore: da sinistra: Unità esterna, Unità interna, Accumulatore*

Fonte: Rotex

Cuore del sistema considerato è l'accumulatore denominato *HybridCube*. È un accumulatore sintetico esente da corrosione con scambiatori in tubo corrugato di acciaio INOX ad alta capacità di scambio termico. La combinazione tra scaldacqua e accumulo lo rende molto efficiente in termini di quantità e qualità dell'acqua calda sanitaria, ideale quindi dal punto di vista dell'igiene idrica.

La produzione dell'acqua calda sanitaria avviene attraverso il principio dello scambio rapido. L'acqua sanitaria viene costantemente ricambiata, quindi non è soggetta né alla formazione di depositi nell'acqua sanitaria, né a fenomeni di proliferazione batterica. In questo modo, *HybridCube* e il bollitore integrato in *HPSUwhite* non necessitano di alcuna manutenzione e non offrono terreno di cultura degli agenti patogeni.

Di seguito sono riportati i dati tecnici dell'accumulatore finora descritto.

ACCUMULATORE HYC 343/19/0		
Dati base		
Contenuto totale	[litri]	300
Peso vuoto	[kg]	59
Lunghezza	[mm]	595
Larghezza	[mm]	615
Altezza	[mm]	1590
Temperatura max consentita per accumulo	[°C]	85
Dispersione a 60°C kWh/24h		1,3
Produzione di acqua calda sanitaria		
Contenuto acqua sanitaria	[litri]	27,8
Pressione massima di esercizio	[bar]	6
Materiale scambiatori		INOX
Superficie scambiatore di carico	[m ²]	5,8
Capacità di scambio	[W/K]	2790
Scambiatore di carico 1 (INOX)		
Contenuto scambiatore	[litri]	13,2
Superficie scambiatore di carico	[m ²]	2,7
Capacità di scambio	[W/K]	1300
Dati di rendimento termico		
Quantità d'acqua senza reintegro con prelievi di 8 l/min / 12 l/min (TAF = 10°C, TACS = 40°C, TACC = 50°C)	[litri]	213/187
Quantità d'acqua senza reintegro con prelievi di 8l/min / 12l/min (TAF = 10°C, TACS = 40°C, TACC = 60°C)	[litri]	283/249
Quantità d'acqua senza reintegro con prelievi di 8l/min / 12l/min (TAF = 10°C, TACS = 40°C, TACC = 65°C)	[litri]	332/292
Tempo di reintegro Prelievo di 140l > 5820 Wh (per vasca da bagno)	[min]	45
Tempo di reintegro Prelievo di 140l > 5820 Wh (per doccia)	[min]	30

Tabella 16: Dati tecnici accumulatore

Fonte: Rotex



2011 classe C

Ecodomus.vi
Certificazione Energetica



Dati identificativi dell'immobile

Indirizzo: Via Fornace 115, 36050 Bressanvido Vicenza
 dati catastali: Foglio: Particella/Sub:
 proprietario/committente: Bigarella Giovanni
 responsabile del calcolo:

Riscaldamento invernale e acqua calda sanitaria

Dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione	120,3 kWh/m ²	(a)
di cui per ventilazione	25,8 kWh/m ²	
Apporti gratuiti utili (η_u medio stagionale = 0,983)	-44,9 kWh/m ²	(b)
Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto degli apporti gratuiti	75,4 kWh/m ²	(c)=(a)+(b)
Perd. emissione ($\eta=0,94$), regolazione ($\eta=0,94$), distribuzione ($\eta=0,98$), accumulo	11,7 kWh/m ²	(d)
Fabbisogno termico lordo al generatore	87,0 kWh/m ²	(e)=(c)+(d)
Contributo collettori solari	0,0 kWh/m ²	(f)
Ausiliari e perdite di produzione	-20,5 kWh/m ²	(g)
Fabbisogno di energia per riscaldamento	66,5 kWh/m ²	(h)=(e)+(f)+(g)
Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria	14,2 kWh/m ²	(1)
Perdite per accumulo	3,4 kWh/m ²	(2)
Altre perdite di impianto	5,6 kWh/m ²	(3)
Contributo collettori solari	-22,3 kWh/m ²	(4)
Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria	0,9 kWh/m ²	(5)=(1)+(2)+(3)+(4)
Fabbisogno annuale di energia nel clima standard	67,4 kWh/m²	(h)+(5)
Fabbisogno annuale di energia nel clima reale	68,2 kWh/m²	



Produzione annuale di anidride carbonica nel clima standard

complessiva: 65,4 kg/anno
 per unità di superficie: 0,38 kg/m²



Interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche

Per la classe	Descrizione sintetica	Fabbis. kWh/m ²	Costo €	Risp. €/anno	P.B. anni
A+					
A					
B+					
B					

Confronto con i requisiti limite

EPI nel clima reale (solo riscaldamento)	67,3 kWh/m ²
limite per interventi ex art. 3 c.1 l.a e c.2 l.a p.1 D.Lgs. 192/05	97,3 kWh/m ²
EPE, invol nel clima reale	18,7 kWh/m ²
limite D.P.R. 59/09 per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a p.1, 2 e l.b D.Lgs. 192/05	30,0 kWh/m ²

Trasmittanza media dell'involucro opaco	0,420 W/(m ² K)
Pareti opache disperdenti inclusi i ponti termici	0,503 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,34 W/(m ² K)
Coperture disperdenti	0,203 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,3 W/(m ² K)
Involucro finestrato inclusi i ponti termici	2,678 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	2,2 W/(m ² K)
Involucro verso ambienti riscaldati	n. pres. W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro disperdente degli ambienti non riscaldati	0,264 W/(m ² K)
lim. per interventi ex art.3 c.1 l.a. c.2 l.a pp.1, 2, l.b e l.c p.1 D.Lgs. 192/05*	0,8 W/(m ² K)
Involucro finestrato degli ambienti non riscaldati	n. pres. W/(m ² K)

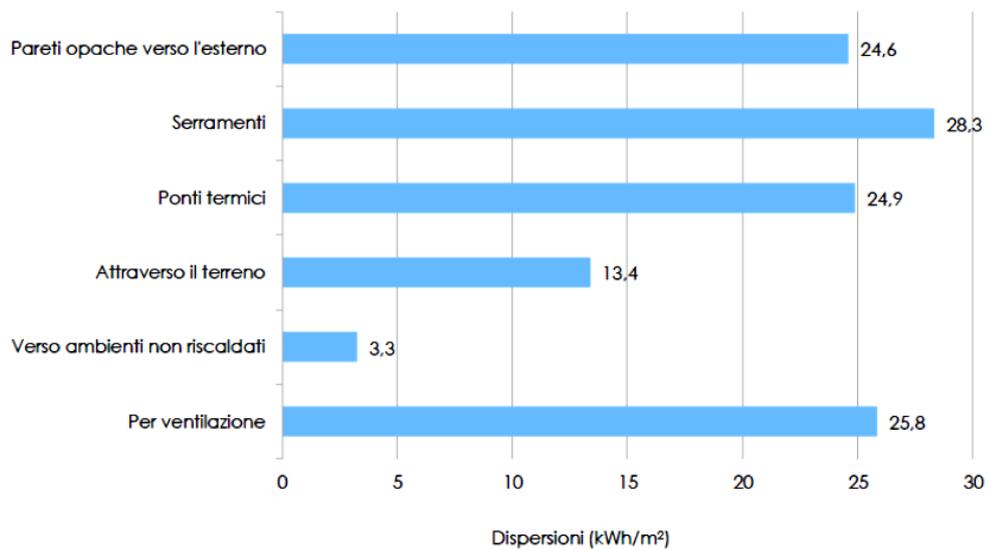
*e interventi ex art.4 c.8 D.P.R. 59/09

Rendimento globale medio stagionale di riscaldamento	113,1%
lim. per interventi ex art.3 c.2 l.c p.2 D.Lgs. 192/05 e art.4 c.5 D.P.R. 59/09	78,1%

Classificazione energetica nazionale

Classe prestazionale per riscaldamento	B
Classe prestazionale per ACS	A
Classe prestazionale globale	B
Qualità prestazionale estiva	II (prestazioni buone)

Ripartizione delle dispersioni attraverso l'involucro e per ventilazione



Parametri di valutazione del comportamento estivo

Costante di tempo delle partizioni opache	94,5 ore
valore minimo di qualità Ecodomus	96 ore
Surriscaldamento strutturale massimo	1,6 °C
valore massimo di qualità Ecodomus	2,0 °C



Fig. 4.12 Risultati Ecodomus Caso 5, Zona E

4.4 Casi di studio Zona climatica F

Per quanto riguarda gli output di Ecodomus per la Zona F, dato che i casi di studio sono gli stessi e che l'unica voce che varia è il "Fabbisogno annuale nel clima reale" non vengono riportati. Tale voce, risulta aumentata di circa il 42% rispetto al risultato che si ha per la Zona climatica E, per cui si terrà conto di questo fattore nella sezione di calcolo riguardante la Zona F.

Anche le migliorie apportate all'impianto o all'involucro non vengono riportate nuovamente dato che sono già state descritte nei paragrafi precedenti.

4.5 Calcoli Zona climatica E

I calcoli sono stati eseguiti con il preciso intento di capire quanti alberi vengono o sono stati utilizzati rispettivamente per fornire la quantità di pellet annuale o per isolare con la fibra di legno l'abitazione considerata. Per fare ciò è stato necessario prima di tutto calcolare il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria e rielaborare i dati.

4.5.1 Energia Primaria per il Riscaldamento

I dati utili al calcolo dell'energia primaria richiesta per il riscaldamento sono in parte forniti dal foglio "risultati" del software Ecodomus, e in parte forniti da tabulazioni relative ai processi di combustione.

Nello specifico, dall'output di Ecodomus, si utilizza:

- Fabbisogno di calore per riscaldamento al netto di apporti gratuiti: (c);
- Perd. per emissione ($\eta = 0,94$), regolazione ($\eta = 0,94$), distribuzione ($\eta = 0,98$), accumulo: (d);
- Fabbisogno termico lordo al generatore: ($e = c + d$);
- Ausiliari e perdite di produzione: (g);

dove le lettere tra parentesi indicano semplicemente la riga del foglio Ecodomus.

Le tabulazioni relative ai processi di combustione forniscono i rendimenti, utili al calcolo del consumo termico ed elettrico ed e i coefficienti di conversione utili al calcolo finale dell'energia primaria.

Seguono quindi le tabelle relative ai valori utilizzati:

Rendimenti	
$\eta_{\text{comb pellet}}$	0,9
$\eta_{\text{medio pellet}}$	0,837
η_{comb}	0,8
$\eta_{\text{cond risc}}$	1
$\eta_{\text{cond ACS}}$	0,95
COP_{risc}	2,9
COP_{ACS}	2,6

Tabella 17: Rendimenti

Coefficients di conversione		
Termico	α_{pellet}	0,3
	$\alpha_{\text{combustione}}$	1
Elettrico	β_{elettro}	2,17

Tabella 18: Coeff. di conversione

Casi di studio		Fabbisogno di calore (c) [kWh/m ²]	Perdite (d) [kWh/m ²]	Fabbisogno Termico lordo (e) [kWh/m ²]	Ausiliari (g) [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	134,8	24,3	159,1	34,2
Caso 1	Pellet	133,6	24,0	157,6	5,2
Caso 2	Isolamento	76,4	11,8	88,2	26,7
Caso 3	Isolam. + pellet	75,4	11,7	87,1	3,5
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	75,4	11,7	87,1	10,3
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	75,4	11,7	87,1	-

Tabella 19: Dati forniti dal Foglio "Risultati" di Ecodomus per riscaldamento

RISCALDAMENTO				
Casi di studio		Consumo Termico CT_{risc} [kWh _t /m ²]	Consumo Elettrico CE_{risc} [kWh _e /m ²]	Energia Primaria Riscaldamento EP_{risc} [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	198,875	34,20	273,09
Caso 1	Pellet	188,292	5,20	67,77
Caso 2	Isolamento	110,250	26,70	168,19
Caso 3	Isolam. + pellet	104,062	3,50	38,81
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	87,10	10,30	109,45
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	-	30,03	65,17

Tabella 20: Tabella riassuntiva dei risultati per il riscaldamento

Nello specifico, i risultati ottenuti in Tabella 20, sono stati calcolati come segue:

- Il **Consumo Termico** (CT_{risc}) è stato ricavato dividendo il Fabbisogno termico Lordo (e) per il rendimento medio della tecnologia considerata, a seconda che il generatore di calore fosse alimentato a pellet o a metano.

$$CT_{risc} = \frac{e}{\eta_{medio}} \left[\frac{kWh_t}{m^2} \right]$$

- Il **Consumo Elettrico** (CE_{risc}) è stato imputato, per i casi da 0 a 4, tutto dovuto agli ausiliari, e quindi pari al valore “g” riportato nel foglio “Risultati” di Ecodomus, mentre per il caso 5, cioè quello in cui la caldaia a metano è stata sostituita da una pompa di calore, è stato necessario tener conto del COP. Quindi sarà pari a:

$$CE_{risc} = \frac{e}{COP_{risc}} \left[\frac{kWh_e}{m^2} \right]$$

- Per il calcolo dell’**Energia Primaria** necessaria per il **Riscaldamento** (EP_{risc}) è necessario tener conto dei fattori di conversione utili a riportare il chilowattora termico ed elettrico in chilowattora semplice in modo da poterli sommare. Il coefficiente di conversione riguardante il consumo termico varia a seconda del generatore di calore considerato. L’Energia primaria è quindi data da:

$$EP_{risc} = CT_{risc} * \alpha + CE_{risc} * \beta_{elettro} \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$$

Nel caso 5, dato che non ci sono ausiliari, l’energia primaria sarà data solo dal secondo termine.

4.5.2 Energia Primaria per Acqua Calda Sanitaria (ACS)

I rendimenti e i coefficienti di conversione considerati sono quelli riportati rispettivamente nelle tabelle 17 e 18, unica cosa, per i casi 4 e 5 è necessario fare attenzione nell’utilizzare il rendimento o il COP con il giusto pedice.

I dati forniti dal software Ecodomus, utili al calcolo dell’energia primaria necessaria all’acqua calda sanitaria, sono nello specifico:

- Fabbisogno di calore per acqua calda sanitaria: (1);
- Perdite per accumulo: (2);
- Altre perdite di impianto: (3);
- Contributo collettori solari: (4);
- Fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria: (5= 1 + 2 + 3+ 4);

Dove i numeri tra parentesi indicano la riga di riferimento di Ecodomus.

Casi di studio		Fabb. di calore	Perdite per accumulo	Altre perdite	Contributo collettori solari	Fabb. di en. per ACS
		(1) [kWh/m ²]	(2) [kWh/m ²]	(3) [kWh/m ²]	(4) [kWh/m ²]	(5) [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	14,2	0	5,6	0	19,8
Caso 1	Pellet	14,2	3,4	5,6	0	23,2
Caso 2	Isolamento	14,2	0	5,6	0	19,8
Caso 3	Isolam. + pellet	14,2	3,4	5,6	0	23,2
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	14,2	3,4	5,6	-12,76	10,44
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	14,2	3,4	5,6	-12,76	10,44

Tabella 21: Dati forniti dal Foglio “Risultati” di Ecodomus per l’ACS

Come si nota dalla tabella sovrastante il valore riguardante la voce “Altre Perdite” è stato standardizzato per tutti i casi. Questo perché, tale voce, è dovuta a tutte quelle perdite di distribuzione, giunzione ecc. e dato che in ogni intervento di miglioramento si è supposto di andare ad agire solo sul generatore di calore tale assunzione risulta corretta.

Per quanto riguarda le perdite di accumulo invece, il valore risulta essere il medesimo perché, come spiegato anche nel capitolo precedente, l’accumulo considerato è sempre di 300 litri e sempre della stessa marca.

ACQUA CALDA SANITARIA				
Casi di studio		Consumo Termico	Consumo Elettrico	Energia Primaria ACS
		CT _{ACS} [kWh _t /m ²]	CE _{ACS} [kWh _e /m ²]	EP _{ACS} [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	24,75	0	24,75
Caso 1	Pellet	27,72	0	8,32
Caso 2	Isolamento	24,75	0	24,75
Caso 3	Isolam. + pellet	27,72	0	8,32
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	10,99	0	10,99
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	0	4,02	8,71

Tabella 22: Tabella riassuntiva dei risultati per l’ACS

Il metodo di calcolo per il Consumo Termico (CT_{ACS}), il Consumo Elettrico (CE_{ACS}) e l’Energia Primaria necessaria per l’Acqua Calda Sanitaria (EP_{ACS}), è il medesimo descritto nel paragrafo precedente per il riscaldamento.

4.5.3 Energia Primaria Totale

ENERGIA PRIMARIA TOTALE				
Casi di studio		Energia Primaria Riscaldamento	Energia Primaria ACS	Energia Primaria TOTALE
		EP_{risc} [kWh/m ²]	EP_{ACS} [kWh/m ²]	EP_{TOT} [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	273,09	24,75	297,84
Caso 1	Pellet	67,77	8,32	76,09
Caso 2	Isolamento	168,19	24,75	192,94
Caso 3	Isolam. + pellet	38,81	8,32	47,13
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	109,45	10,99	120,44
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	65,17	8,71	73,89

Tabella 23: Tabella relativa all'Energia Primaria Totale

Per quanto riguarda il calcolo dell'energia primaria totale (EP_{TOT}) è dato semplicemente dalla somma tra l'Energia Primaria necessaria al riscaldamento e l'Energia Primaria necessaria a l'acqua calda sanitaria.

$$EP_{TOT} = EP_{risc} + EP_{ACS} \quad \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$$

4.5.4 Fabbisogno di pellet e Alberi Equivalenti

Grazie all'Energia Primaria Totale (EP_{TOT}) è stato possibile ricavare il fabbisogno annuo di pellet e da questo risalire alla quantità di alberi necessari per fornire tale quantitativo, vero scopo di questo studio. Per i calcoli che seguono sono stati utilizzati i seguenti valori:

Potere Calorifico	PCI_{pellet}	5,36	[kWh/kg]
Densità	ρ_{pellet}	650	[kg/m ³]
	$\rho_{abete-rosso}$	450	[kg/m ³]
	$\rho_{segatura}$	300	[kg/m ³]
Coeff.	$\tau_{seg-pellet}$	1,4	
Area Riscaldata		173,47	[m ²]

Tabella 24: Tabella utile alla conversione da pellet a alberi

Le fonti delle singole voci ovviamente sono diverse.

Per quanto riguarda il pellet i dati sono stati ottenuti dal sito del produttore. Che nello specifico risulta essere la "BIEMME ENERGIA S.R.L."

È stato scelto un pellet di Abete rosso in quanto è lo stesso legno che viene utilizzato per la produzione di isolanti in fibra di legno, inoltre è la tipologia di pianta preponderante nelle nostre alpi. Questo comporta quindi un minor inquinamento dato che la materia prima non viene importata bensì è recuperabile sul territorio nazionale. Di seguito è riportata la scheda tecnica del pellet in esame:

Pellet di Abete Rosso		
Ottenuto dalla lavorazione di polpa di puro abete rosso, senza aggiunta di corteccia o di additivi chimici. L'alto potere calorifico ed il bassissimo residuo di ceneri ne fanno uno dei migliori pellet sul mercato		
Diametro	6	[mm]
Lunghezza max	30	[mm]
Umidità	8	[%]
Ceneri	0,18	[%]
Zolfi	0,01	[%]
Potere Calorifico	5,36	[kWh/kg]
Densità	650	[kg/m ³]
Certificazione DINplus		



Tabella 25: Scheda tecnica Pellet
Fonte: *Biemme Energia S.r.l.*

La densità dell'abete rosso è stata ricavata da una scheda informativa riportata sul sito <http://www.altoadige-suedtirol.it> di cui si riporta le caratteristiche tecniche fornite di tale scheda:

L'Abete Rosso	
Nome scientifico:	<i>Picea abies</i> Karst
Areale di crescita:	in Italia cresce nella zona alpina, in Europa è presente in tutta la fascia centro-settentrionale e nei Balcani.
Aspetto e caratteristiche del legno:	non vi è differenziazione tra alburno e durame, essendo il colore giallognolo biancastro. Il legno contiene resina e presenta vere e proprie "tasche" intrecluse nei tessuti. Frequente anche la presenza di legno di compressione (canastro)
Densità	allo stato fresco circa 860 kg/m ³ , dopo normale stagionatura circa 450 kg/m ³
Struttura istologica:	tessitura media, fibratura abbastanza dritta o elicoidale.
Ritiro volumetrico:	da basso a medio
Impieghi principali:	costruzioni di vario genere, alberi da nave, paleria, imballaggi, materiale di triturazione per pannelli e per carta cellulosa. Per uso esterno è opportuno eseguire trattamenti di preservazione, che risultano quasi sempre, però, di scarsa penetrazione.

Tabella 26: Scheda tecnica Abete Rosso
Fonte: <http://www.altoadige-suedtirol.it>

I dati relativi alla segatura sono utili perché, per ottenere il pellet (e anche gli isolanti naturali) non si utilizza direttamente il legname bensì la segatura cioè, l'insieme dei minuti frammenti prodotti dal taglio con la sega. Nel gergo moderno il termine si riferisce quasi sempre al truciolo di legno residuo generato dalle lavorazioni di falegnameria, tra cui la segatura, che più propriamente si chiama “*segatura di legno*”. Di seguito vengono riportate le sue caratteristiche tecniche.

Segatura		
Potere Calorifico Superiore	4,2	[kWh/kg]
Densità	200 ÷ 400	[kg/m ³]
Umidità	15 ÷ 30	[%]
Ceneri	0,5 ÷ 1,1	[% in peso]

Tabella 27: Scheda tecnica Segatura

Fonte: <http://www.tatano.com>.

Per quanto concerne il coefficiente denominato con “ $\tau_{\text{seg-pellet}}$ ” il discorso è leggermente diverso, infatti non è un valore tabulato, bensì si tratta di un valore medio ottenuto dalle ditte produttrici contattate, e corrisponde sostanzialmente al rapporto tra segatura e pellet. Cioè identifica quanti chilogrammi di segatura servono per ottenere un chilogrammo di pellet. Nello specifico risulta essere circa un 40% maggiore.

L'area riscaldata non è altro che l'area abitabile della bifamiliare, cioè tutta la porzione sinistra di bifamiliare, garage esclusi.

Dato che la caldaia a pellet è stata installata solo nei casi 1 e 3 ci si limita a riportare solo questi due:

Fabbisogno di pellet						
Casi di studio		Consumo di pellet			Quantità di segatura	
		[kg/m ²]	[kg]	[m ³]	[kg]	[m ³]
Caso 1	Pellet	14,20	2462,46	3,79	3447,44	11,49
Caso 3	Isolam. + pellet	8,79	1525,28	2,35	2135,39	7,12

Tabella 28: Fabbisogno di Pellet

Dato che molti passaggi sono stati eseguiti solo a livello informativo, o comunque facilmente ottenibili mediante una semplice analisi dimensionale, ci si limita ad indicare come è stato ottenuto il primo valore del consumo di pellet e il primo valore della quantità di segatura.

$$\text{Consumo di Pellet} = \frac{EP_{tot}}{PCI_{pellet}} \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$

$$\text{Quantità di segatura} = \text{Consumo di Pellet in [kg]} * \tau_{\text{seg-pellet}} \quad [kg]$$

Il consumo di pellet è stato convertito in quantità di segatura proprio per permettere poi la conversione in alberi. Per fare ciò è necessario conoscere i volumi propri dell'Abete rosso. I dati relativi alla prima colonna sono stati forniti dalla ditta "Imola Legno S.p.a.", mentre la seconda è una semplice conversione ottenuta moltiplicando tale valore per il rapporto tra la densità dell'abete rosso e la densità della segatura. Cioè:

$$Segatura = Legno * \frac{\rho_{Abete\ rosso}}{\rho_{segatura}} \quad [m^3]$$

Volumi	Legno	Segatura
	[m ³]	[m ³]
Volume Medio Abete tagliato	3	4,5
Volume Medio Scarti	1,3	1,95
Volume Medio Abete rosso	4,3	6,45

Tabella 29: Volumi equivalenti

Fonte: Imola Legno S.p.a.

Mettendo insieme i dati presenti nelle tabelle 27 – 28 – 29 si giunge alla conclusione seguente:

Alberi corrispondenti al consumo di pellet annuale				
Casi di studio		Numero alberi Usando Scarti	Numero alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
Caso 1	Pellet	6	3	2
Caso 3	Isolam. + pellet	4	2	1

Tabella 30: Alberi relativi al solo fabbisogno di Pellet

I risultati, ottenuti dividendo la quantità di segatura corrispondente al fabbisogno di pellet per il volume corrispondente alla sezione considerata, sono stati suddivisi in tre voci in modo da differenziare la materia prima utilizzata, ipotizzando comunque di "convertire" tutto in segatura.

È da tenere presente che il risultato relativo al caso 3 non tiene conto degli alberi utilizzati per isolare l'abitazione, per cui nei risultati complessivi bisognerà tener conto anche di tale valore.

4.5.5 Quantità di Isolante e Alberi Equivalenti

Il ragionamento è lo stesso che si è svolto nel paragrafo precedente, infatti anche qui vengono utilizzate le tabelle 27 – 28 – 29, che quindi non verranno riportate.

Dato che il materiale isolante, nei casi in cui è stato applicato, è sempre lo stesso non indichiamo il caso, ma il tipo di materiale utilizzato.

Fabbisogno di Legno per Isolare							
Superficie coibentata	Nome Pannello	Spessore Isolante	Superficie Isolata	Massa volumica (ρ)	Quantità di isolante		Quantità Legno
		[m]	[m ²]	[kg/m ³]	[m ³]	[kg]	[m ³]
Muro esterno	Pavawall	0,12	195,92	150	23,51	3526,56	7,84
Muro abitazione/garage	Pavadentro	0,1	27,73	180	2,77	499,14	1,11
Solaio	Pavatherm	0,1	102,87	140	10,29	1440,18	3,20

Tabella 31: *Quantità Isolante e Legno Equivalente*

Avendo convertito l'isolante in Legno e non in segatura, dovrò considerare i volumi riferiti al legno (prima colonna tabella 29).

Si perviene perciò al risultato seguente:

Alberi necessari per Isolare			
Superficie coibentata	Numero alberi Usando Scarti	Numero alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
	Muro esterno	6	3
Muro abitazione/garage	1	0,4	0,3
Solaio	2	1	1
TOTALE	9	4	3

Tabella 32: *Alberi equivalenti per isolare*

4.5.6 Consumo di Alberi Totale

Lo studio viene effettuato nell'arco di 30 anni per cui i risultati ottenuti nel paragrafo 4.3.4 andranno moltiplicati per 30 e nel caso 3 andrò a sommare anche il numero di alberi relativo all'isolamento. In totale si otterrà quindi:

Consumo di Alberi dopo 30 anni				
Casi di studio		Numero alberi Usando Scarti	Numero Alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	0	0	0
Caso 1	Pellet	177	77	53
Caso 2	Isolamento	9	4	3
Caso 3	Isolam. + pellet	119	52	36
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	9	4	3
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	9	4	3

Tabella 33: *Numero di alberi necessari per il fabbisogno di pellet e isolare l'abitazione. Stima su 30 anni.*

Ovviamente, andando ad isolare, non è come per il pellet che necessito annualmente di un certo quantitativo di materia prima, perché una volta utilizzato il legname utile a fornirmi il quantitativo di isolante per coibentare l'abitazione io non ne ho più bisogno.

Questo risultato è comunque significativo perché mi fornisce il numero di alberi necessari a coibentare una casa media.

Quindi se ad esempio volessi isolare altre 100 case, che per ipotesi avessero le stesse dimensioni, o meglio necessitassero dello stesso quantitativo di isolante, avrei bisogno di 900, 400 o 300 alberi a seconda di cosa o come decido di utilizzare per materia prima.

4.5.7 CO₂ e relativi grafici

Grazie all'Energia Primaria Totale calcolata precedentemente è stato possibile, mediante il fattore di conversione qui di seguito riportato, calcolare la quantità di CO₂, espressa in kg, emessa annualmente e dopo 30 anni.

Coeff. di conversione EP/CO ₂	
α_{CO_2}	0,195

$$CO_2emessa = EP_{TOT} * \alpha_{CO_2} \text{ [kg di CO}_2\text{]}$$

Dai valori ottenuti è possibile confrontare ogni singolo caso con quello di riferimento, andando così a determinare la quantità di CO₂ risparmiata annualmente e dopo 30 anni per ogni intervento effettuato.

Esempio di calcolo:

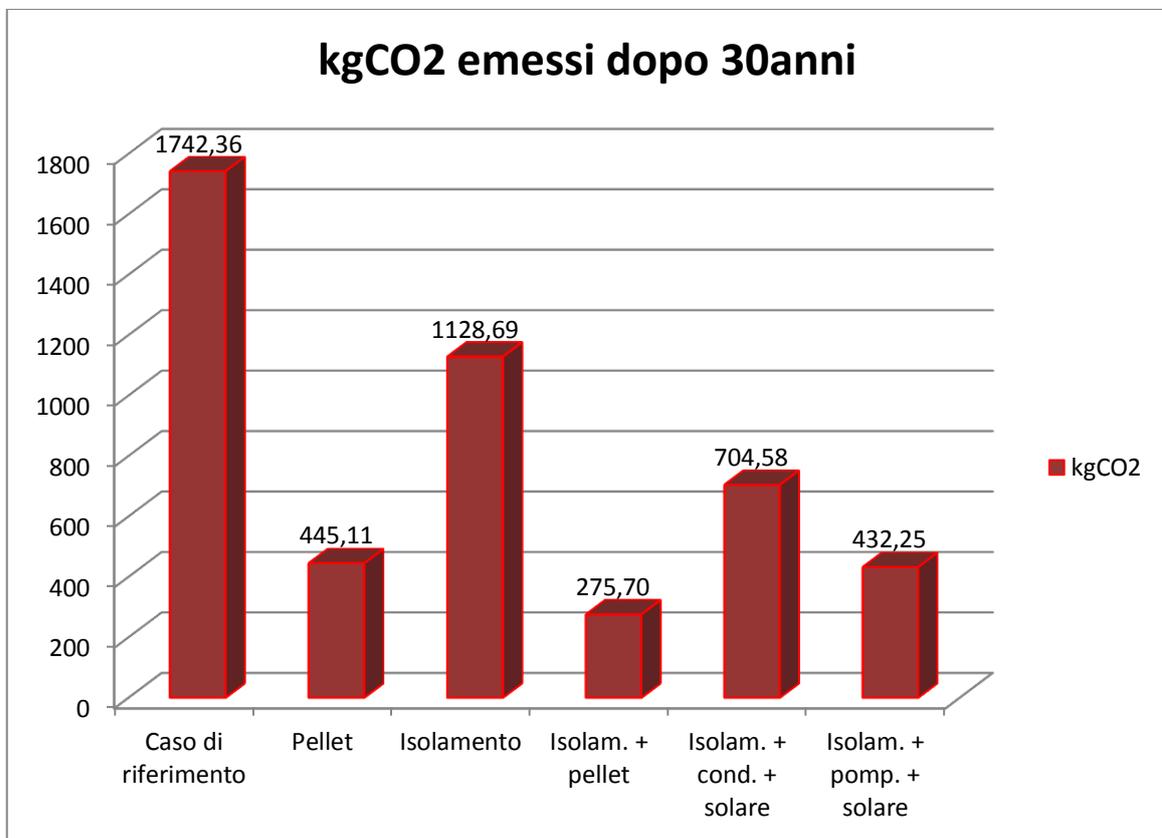
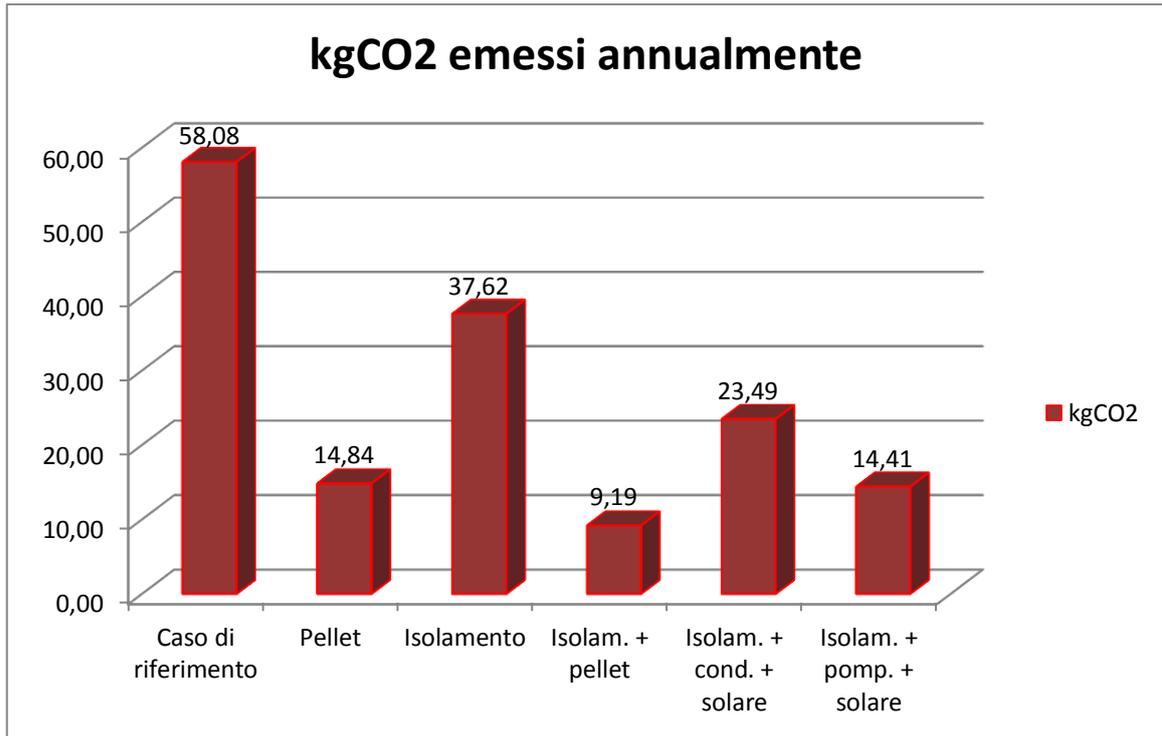
$$\Delta CO_2annuale = CO_2emessa \text{ Caso } 0 - CO_2emessa \text{ Caso } 1 \text{ [kg di CO}_2\text{]}$$

Nel complesso si avrà:

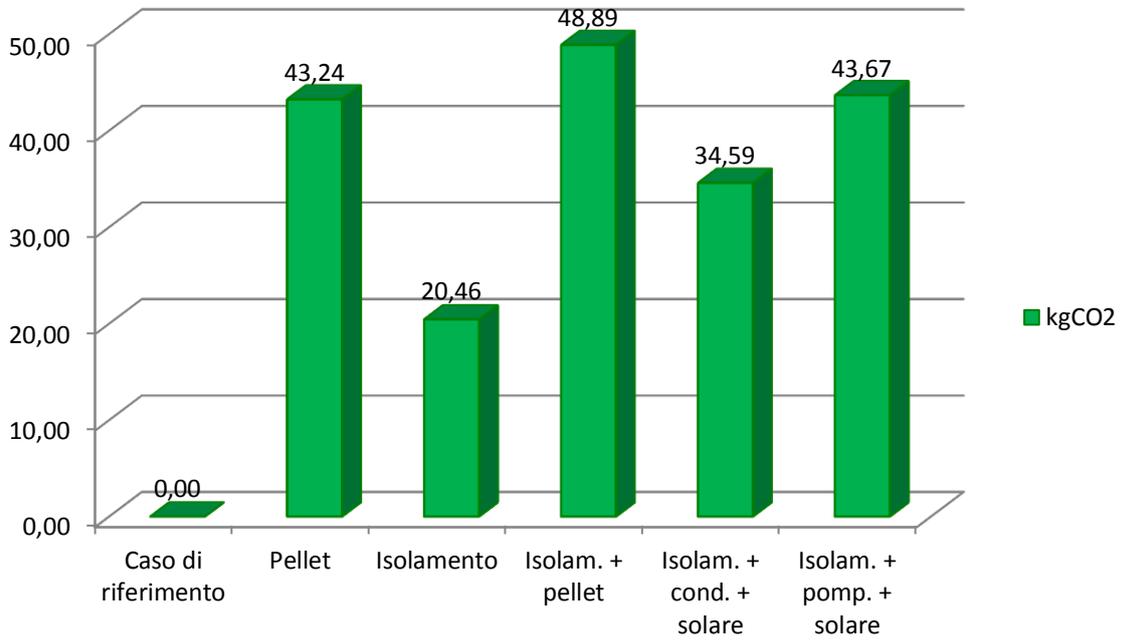
CO ₂					
Casi di studio		CO ₂ Emessa annualmente [kg di CO ₂]	CO ₂ Emessa dopo 30anni [kg di CO ₂]	ΔCO_2 risparmiata annualmente [kg di CO ₂]	ΔCO_2 risparmiata dopo 30anni [kg di CO ₂]
Caso 0	Caso di riferimento	58,08	1742,36	0,00	0
Caso 1	Pellet	14,84	445,11	43,24	1297,25
Caso 2	Isolamento	37,62	1128,69	20,46	613,67
Caso 3	Isolam. + pellet	9,19	275,70	48,89	1466,65
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	23,49	704,58	34,59	1037,78
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	14,41	432,25	43,67	1310,11

Tabella 34: kg di CO₂ emessi e risparmiati nei vari casi

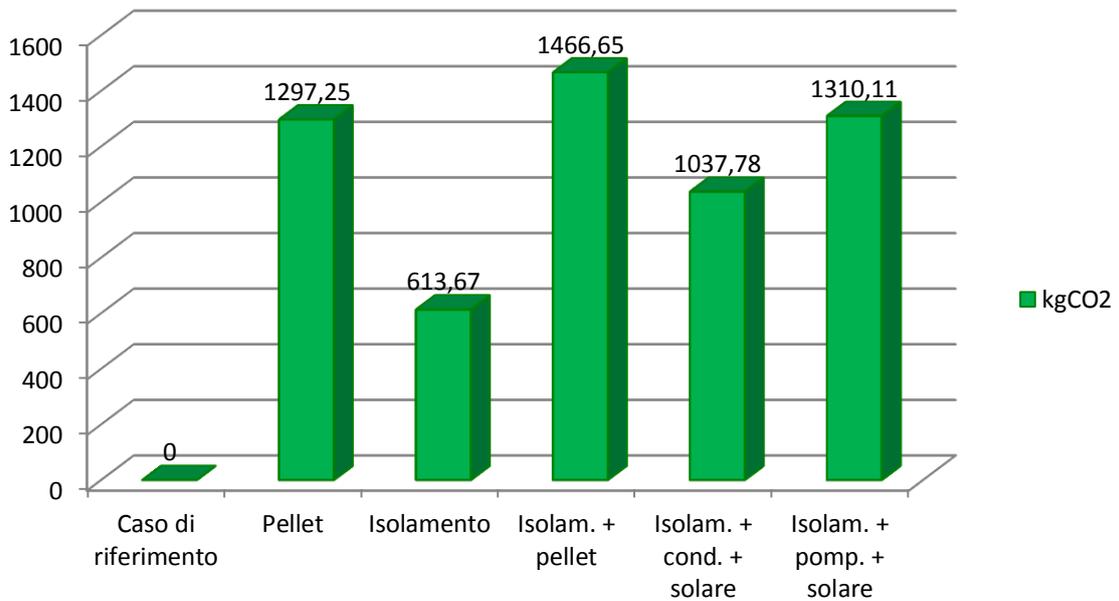
Nelle pagine seguenti sono riportati gli istogrammi relativi alla tabella precedente.



kgCO2 risparmiati annualmente



kgCO2 risparmiata dopo 30anni



4.5.8 Risultati conclusivi

Grazie ai risultati forniti nella *Tabella 34* e nella *Tabella 33*, e tenendo presente che un albero assorbe mediamente circa 10kg di CO₂ all'anno, è stato possibile risalire al totale fabbisogno di alberi necessario a contrastare le emissioni nocive e fornire la materia prima utile a rendere disponibile il quantitativo di pellet, di isolante o di entrambi. Ovviamente, come si nota sia dalla tabella che dal grafico che la segue, il numero maggiore di alberi lo si avrà utilizzando solo il materiale di scarto, dato che risulta essere pari solo al 30% del volume totale dell'albero. È però importante sottolineare che l'utilizzo del solo materiale di scarto, per produrre pellet o isolante, risulta più corretto e appropriato rispetto al trasformare l'intero albero in trucioli e poi in pellet, pratica che infatti non viene neanche considerata.

Ciò nonostante si è voluto calcolare il numero di alberi necessari ad assorbire la CO₂ emessa in trent'anni utilizzando l'intera pianta, o comunque il tronco in modo da avere un confronto con il primo risultato che si ottiene.

Alberi necessari per assorbire la CO₂ emessa in 30 anni				
Casi di studio		Numero alberi Usando Scarti	Numero alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	174	174	174
Caso 1	Pellet	221	121	98
Caso 2	Isolamento	122	117	116
Caso 3	Isolam. + pellet	146	79	64
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	80	75	73
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	53	47	46

Tabella 35: *Numero di alberi totali*

Andando a graficare tale risultato viene messo particolarmente in evidenza come, specialmente nei casi con caldaia a pellet, l'utilizzo del solo materiale di scarto per fornire il fabbisogno totale di pellet richiesto nell'arco di vita (stimato pari a 30 anni) sommato al numero di alberi necessario ad assorbire la CO₂ emessa nel periodo di esercizio, comporti un netto aumento del numero di alberi. Nel caso di sola caldaia a Pellet, senza l'isolamento a cappotto, il numero di alberi utile a tale scopo supera persino l'obsoleta caldaia a metano.

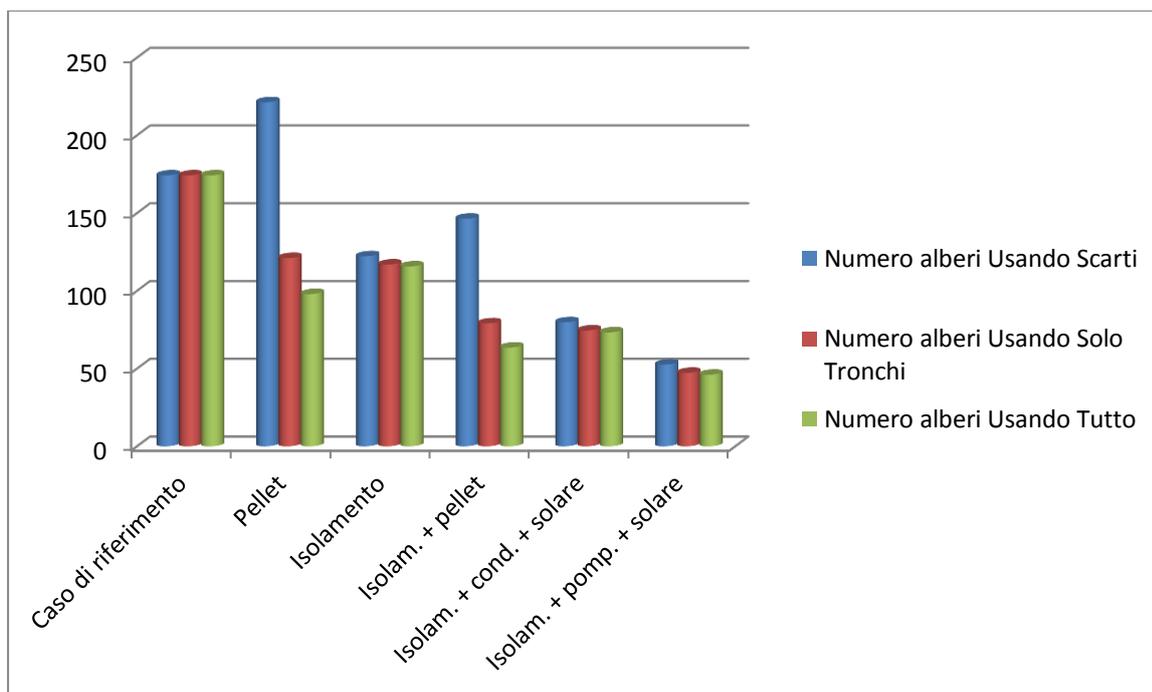


Grafico: Numero di alberi necessari in 30 anni per il totale assorbimento di CO₂

Da studi effettuati sul web si è ricavato che un ettaro di bosco conta dai 250 ai 325 Abeti Rossi. Questo valore, rapportato ai risultati forniti dalla tabella 35 consente di ricavare quanto il territorio viene sfruttato per i nostri scopi.

Terreno necessario				
Casi di studio		Usando Scarti	Usando Solo Tronchi	Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	0,697	0,697	0,697
Caso 1	Pellet	0,885	0,484	0,392
Caso 2	Isolamento	0,489	0,468	0,463
Caso 3	Isolam. + pellet	0,586	0,316	0,254
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	0,319	0,298	0,293
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	0,210	0,189	0,184

Tabella 36: Sfruttamento del terreno

Si può notare quindi, che anche nel caso di maggior richiesta di alberi, per rendere disponibile la quantità totale, utilizzo meno di un ettaro di bosco ogni 30 anni.

Altra Tabella molto importante è stata ricavata andando a rapportare i risultati ottenuti nella Tabella 34, con quelli ottenuti nella Tabella 35.

Precisamente, si è diviso il valore della ΔCO_2 risparmiata in 30 anni, con ogni singolo valore della tabella 35.

Il valore che ne risulta, non è esattamente un indice di efficienza, ma da un'idea di quale tecnologia, rende la gestione ambientale più sostenibile.

ΔCO_2 risparmiata rispetto gli alberi totali				
Casi di studio		Usando Scarti	Usando Solo Tronchi	Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	0	0	0
Caso 1	Pellet	5,86	10,71	13,24
Caso 2	Isolamento	5,02	5,25	5,30
Caso 3	Isolam. + pellet	10,02	18,55	23,10
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	13,00	13,93	14,16
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	24,92	27,71	28,45

Tabella 37: *Coefficiente di Impatto ambientale*

È solo un valore teorico, senza un vero e proprio significato fisico, infatti non è che l'albero vada ad assorbire più o meno CO_2 a seconda della tecnologia installata nell'abitazione, ma semplicemente identifica quale tecnologia è meno impattante a livello ambientale.

Quindi nei casi di studio trattati, la tecnologia che risulta avere il minor impatto ambientale è la Pompa di calore, abbinata ad un sistema di isolamento a cappotto e ad un solare termico.

La soluzione che al contrario mostra il maggior impatto ambientale, nonostante richieda un numero minore di alberi rispetto al caso con alimentazione a pellet, risulta essere il semplice isolamento termico. Mantenendo una vecchia caldaia, e limitando le migliorie alle opere edili i benefici sono ridotti.

Un buon compromesso lo si ha per l'isolamento abbinato alla caldaia a pellet.

4.6 Calcoli Zona climatica F

Dato che i processi di calcolo sono gli stessi, si riportano solamente le tabelle di maggior interesse senza perciò andare a indicare le formule relative.

4.6.1 Energia Primaria per il riscaldamento

Come anticipato nel paragrafo 4.2.7, l'unico valore che cambia in Ecodomus rispetto alla zona climatica E, è il “*Fabbisogno annuale di energia nel clima reale*”. Tale valore, rapportato con il “Fabbisogno annuale di energia nel clima standard”, risulta essere maggiore di un 42%.

Per la zona climatica F si sono quindi maggiorati i valori forniti da Ecodomus per il riscaldamento (gli stessi che utilizzati per la zona E) per l'appunto di un 42%

Per quanto riguarda i rendimenti e i coefficienti di conversione utilizzati, fatta eccezione per il COP_{risc} che viene considerato pari a 2,6 al posto che 2,9, sono gli stessi riportati nelle tabelle 17 e 18.

Risulta quindi:

Casi di studio		Fabb. di calore (c) [kWh/m ²]	Perdite (d) [kWh/m ²]	Fabb. Termico lordo (e) [kWh/m ²]	Ausiliari (g) [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	191,416	34,506	225,922	34,2
Caso 1	Pellet	189,712	34,1	223,792	5,2
Caso 2	Isolamento	116,128	16,756	132,884	26,7
Caso 3	Isolam. + pellet	107,068	16,614	123,682	3,5
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	107,068	16,614	123,682	10,3
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	107,068	16,614	123,682	-

Tabella 38: Dati Forniti dal foglio “Risultati” di Ecodomus per il Riscaldamento

RISCALDAMENTO				
Casi di studio		Consumo Termico CT [kWh/m ²]	Consumo Elettrico CE [kWh/m ²]	Energia Primaria Riscaldamento EP _{risc} [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	282,40	34,20	356,62
Caso 1	Pellet	267,37	5,20	91,50
Caso 2	Isolamento	166,11	26,70	224,04
Caso 3	Isolam. + pellet	147,77	3,50	51,93
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	123,68	10,30	146,03
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	-	47,57	103,23

Tabella 39: Tabella riassuntiva dei risultati per il riscaldamento

4.6.2 Energia Primaria per l'ACS

Dato che per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria non sono state apportate modifiche, si rimanda il tutto al paragrafo 4.5.2. Le tabelle infatti rimangono invariate per cui non vengono riportate.

4.6.3 Energia Primaria Totale

ENERGIA PRIMARIA TOTALE				
Casi di studio		Energia Primaria Riscaldamento	Energia Primaria ACS	Energia Primaria Totale
		EP_{risc} [kWh/m ²]	EP_{ACS} [kWh/m ²]	EP_{TOT} [kWh/m ²]
Caso 0	Caso di riferimento	356,62	24,75	381,37
Caso 1	Pellet	91,50	8,32	99,81
Caso 2	Isolamento	224,04	24,75	248,79
Caso 3	Isolam. + pellet	51,93	8,32	60,24
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	146,03	10,99	157,02
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	103,23	8,71	111,94

Tabella 40: Tabella relativa all'Energia Primaria Totale

4.6.4 Fabbisogno di pellet e Alberi equivalenti

Anche qui ci si limita a riportare le tabelle relative al Fabbisogno di pellet, e agli alberi corrispondenti a tale consumo, dato che i dati utilizzati per effettuarei calcoli sono gli stessi riportati nel paragrafo 4.5.4.

Fabbisogno di pellet						
Casi di studio		Consumo di pellet			Quantità di segatura	
		[kg/m ²]	[kg]	[m ³]	[kg]	[m ³]
Caso 1	Pellet	18,62	3230,28	4,97	4522,40	15,07
Caso 3	Isolam. + pellet	11,24	1949,62	3,00	2729,47	9,10

Tabella 41: Fabbisogno di pellet

Alberi corrispondenti al consumo di pellet annuale				
Casi di studio		Numero alberi Usando Scarti	Numero alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
Caso 1	Pellet	8	3	2
Caso 3	Isolam. + pellet	5	2	1

Tabella 42: Alberi relativi al solo Fabbisogno di Pellet

Valgono le stesse considerazioni fatte per la Zona E, per cui al caso 3 dovrò sommare il quantitativo di alberi necessario per isolare.

4.6.5 Quantità di isolante e Alberi Equivalenti

La casa considerata nella zona climatica F è la stessa, per cui anche l'isolamento necessario e il relativo quantitativo di alberi rimane invariato. Vedi paragrafo 4.5.5.

4.6.6 Consumo di Alberi Totale

Consumo di Alberi dopo 30 anni				
Casi di studio		Numero alberi Usando Scarti	Numero alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	0	0	0
Caso 1	Pellet	232	100	70
Caso 2	Isolamento	9	4	3
Caso 3	Isolam. + pellet	149	65	45
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	9	4	3
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	9	4	3

Tabella 43: Numero di alberi necessari per il fabbisogno di pellet e isolare l'abitazione. Stima su 30 anni.

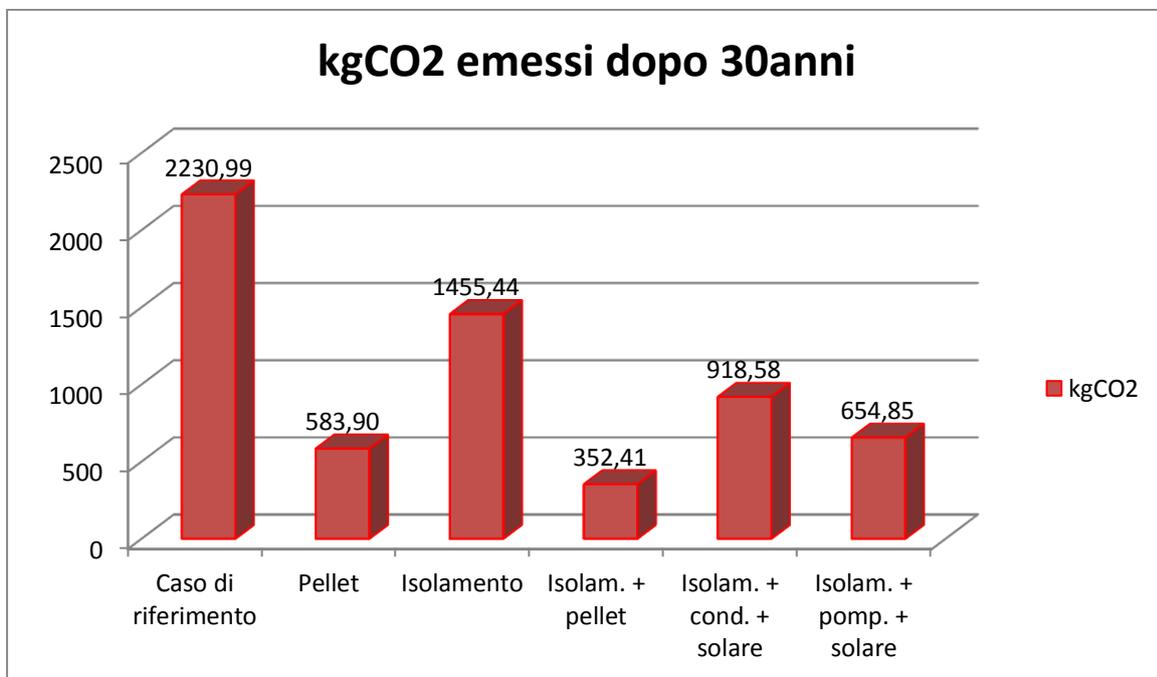
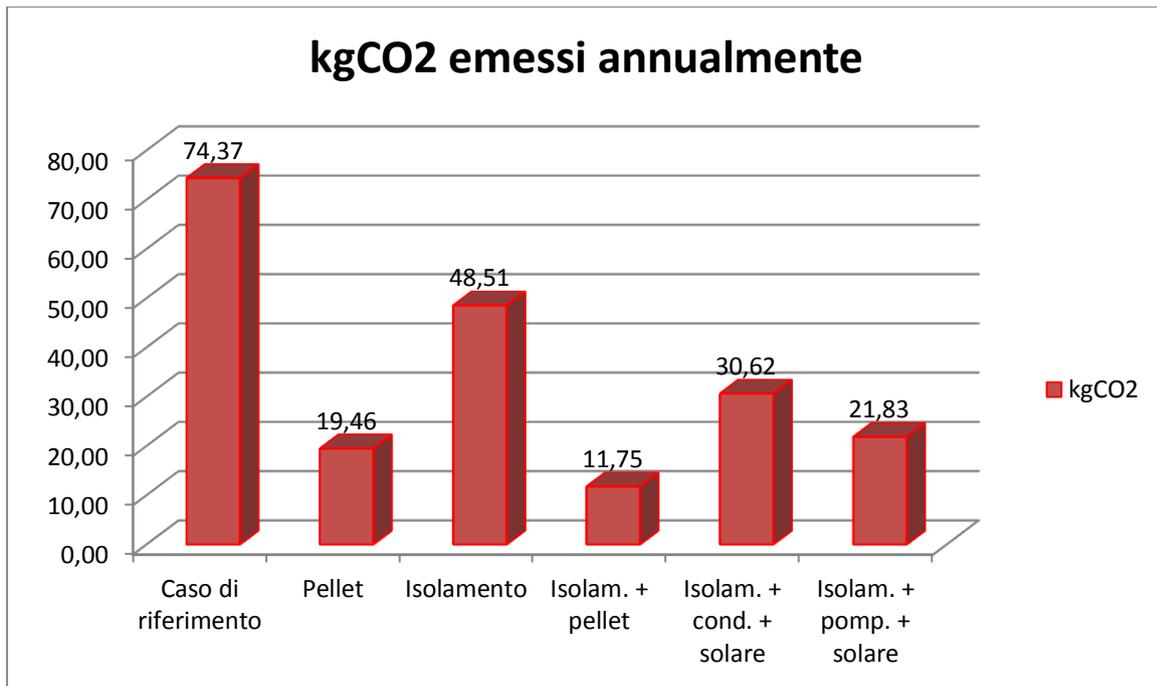
Dato la richiesta di Energia Primaria per il riscaldamento aumentata del 42%, anche il quantitativo di pellet necessario annualmente risulta maggiorato e conseguentemente il relativo numero di alberi equivalenti.

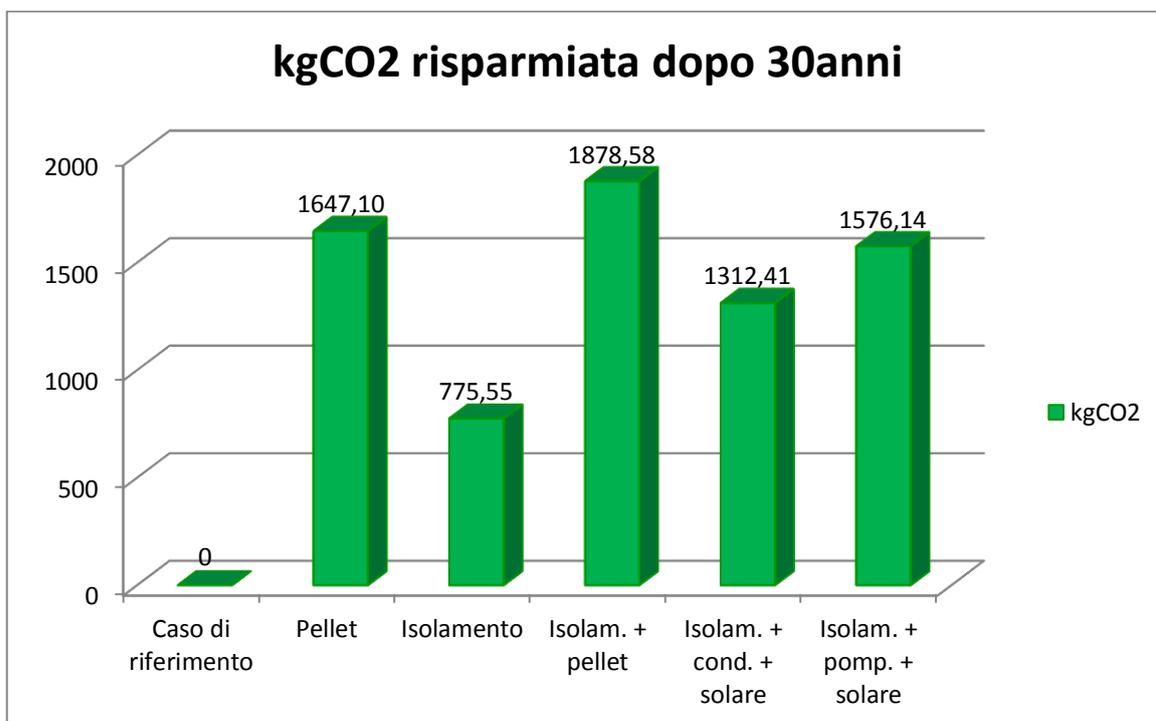
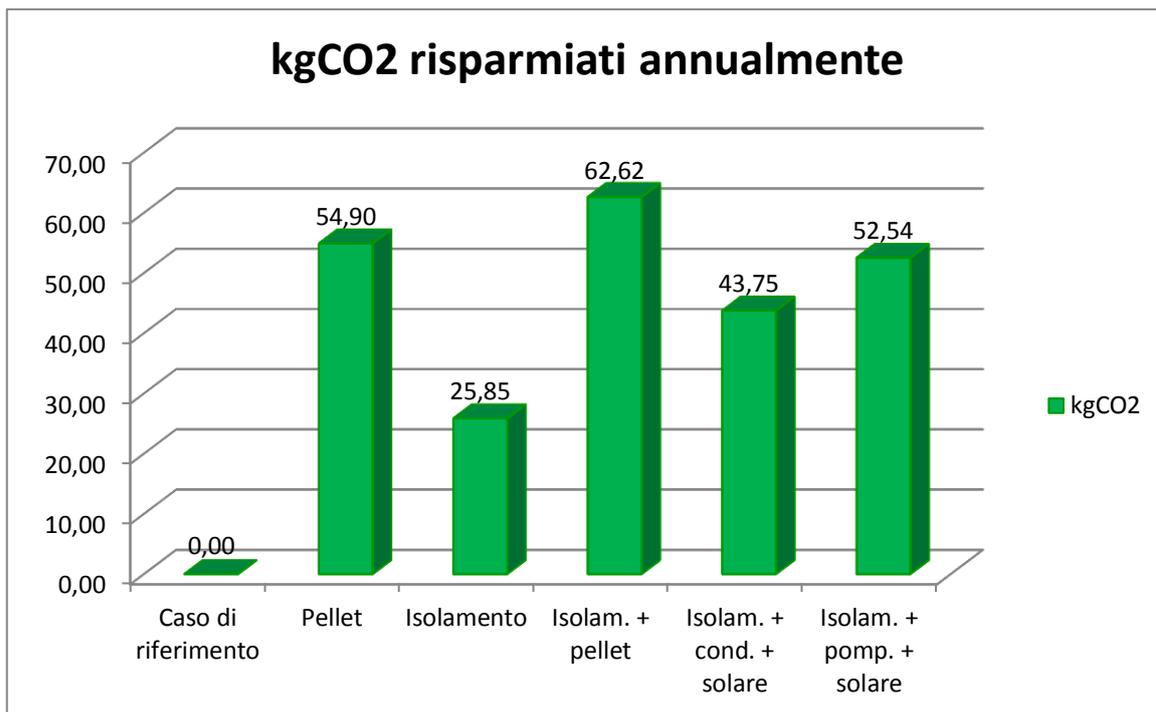
4.6.7 CO₂ e relativi grafici

CO ₂					
Casi di studio		CO ₂ Emessa annualmente [Kg di CO ₂]	CO ₂ Emessa dopo 30anni [Kg di CO ₂]	ΔCO ₂ risparmiata annualmente [Kg di CO ₂]	ΔCO ₂ risparmiata dopo 30anni [Kg di CO ₂]
Caso 0	Caso di riferimento	74,37	2230,99	0,00	0
Caso 1	Pellet	19,46	583,90	54,90	1647,10
Caso 2	Isolamento	48,51	1455,44	25,85	775,55
Caso 3	Isolam. + pellet	11,75	352,41	62,62	1878,58
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	30,62	918,58	43,75	1312,41
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	21,83	654,85	52,54	1576,14

Tabella 44: kg di CO₂ emessi e risparmiati nei vari casi

Nelle pagine successive seguono i grafici relativi alla tabella 44.





4.6.8 Risultati conclusivi

Alberi necessari per assorbire la CO ₂ emessa in 30 anni				
Casi di studio		Numero alberi Usando Scarti	Numero alberi Usando Solo Tronchi	Numero alberi Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	223	223	223
Caso 1	Pellet	290	159	129
Caso 2	Isolamento	155	150	148
Caso 3	Isolam. + pellet	185	100	80
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	101	96	95
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	75	70	68

Tabella 45: Numero di alberi totali

Di seguito viene riportato il grafico relativo alla tabella sovraesposta. Grazie all'istogramma, come nel paragrafo 4.5.8, viene subito evidenziato come il numero di alberi, utilizzando solo scarti, per la produzione di pellet e/o isolante, sia nettamente superiore.

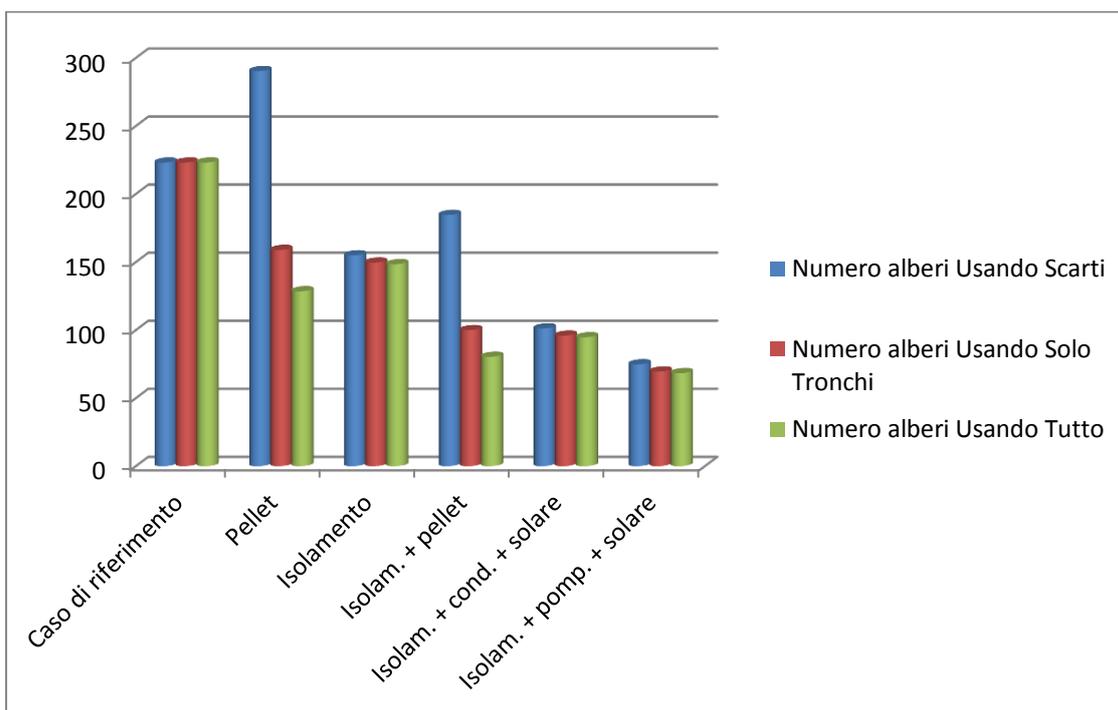


Grafico: Numero di alberi necessari in 30 anni per il totale assorbimento di CO₂

Lo sfruttamento del terreno per questa zona climatica, risulta maggiore rispetto alla zona climatica E, come ci aspettava.

Terreno necessario				
Casi di studio		Usando Scarti	Usando Solo Tronchi	Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	0,89	0,89	0,89
Caso 1	Pellet	1,16	0,64	0,51
Caso 2	Isolamento	0,62	0,60	0,59
Caso 3	Isolam. + pellet	0,74	0,40	0,32
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	0,40	0,38	0,38
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	0,30	0,28	0,27

Tabella 46: *Sfruttamento del terreno, Zona F*

Per quanto riguarda i risultati di quello che definiremo impropriamente “indice di Efficienza” abbiamo:

ΔCO_2 risparmiata rispetto agli alberi totali				
Casi di studio		Usando Scarti	Usando Solo Tronchi	Usando Tutto
Caso 0	Caso di riferimento	0	0	0
Caso 1	Pellet	5,67	10,37	12,82
Caso 2	Isolamento	5,01	5,18	5,23
Caso 3	Isolam. + pellet	10,18	18,80	23,37
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	12,97	13,68	13,86
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	21,06	22,67	23,07

Tabella 47: *Coefficiente di Impatto Ambientale, Zona F*

4.7 Conclusioni

Confrontando i risultati ottenuti per le due zone climatiche, risulta evidente che, a causa del clima più rigido presente in Zona F, l'energia primaria richiesta è superiore. Ciò porta ad un conseguente aumento di combustibile, emissioni, alberi necessari all'assorbimento della CO_2 e conseguentemente di superficie necessaria per il rimboschimento.

La superficie necessaria per fornire alberi a sufficienza per contrastare le emissioni nocive e rendere disponibile il totale quantitativo di pellet, cioè nel caso di sfruttamento massimo di biomassa legnosa (Caso 1), si attesta comunque intorno ad un ettaro ogni 30 anni. Dato piuttosto significativo se si pensa essere riferito ad una sola abitazione di medie dimensioni.

Un confronto molto interessante lo si ha tra il Caso 1 e il Caso 3.

Infatti l'applicazione dell'isolamento a cappotto abbinato alla caldaia a pellet, nonostante necessiti di un certo numero di alberi per rendere disponibile il materiale isolante porta ad una riduzione dell'energia primaria richiesta rispetto al Caso 1 pari ad un 40% circa in entrambe le zone climatiche con conseguente riduzione delle emissioni, degli alberi necessari ad assorbirle, del quantitativo di pellet e degli alberi per renderlo disponibile. Infatti anche nelle Tabelle 37 e 47 si mostra come la tecnologia di miglior compromesso, mentre non si può dire altrettanto del Caso 1. Questa soluzione porta infatti ad una netta riduzione della CO₂, ma non ad un sfruttamento responsabile del territorio, dato il maggior numero di alberi necessario a far fronte alla richiesta di pellet.

La soluzione che porta a basse emissioni e uno sfruttamento sostenibile del territorio risulta quindi essere la pompa di calore.

5. CONTO ECONOMICO

Prima di andare ad analizzare le voci significative sui tempi di ritorno degli investimenti e sul Valore Attuale Netto (VAN) vengono riportati di seguito i costi di investimento per ogni singolo caso, uguali per zona E e zona F, fatta eccezione per il caso di riferimento dove non è stato effettuato alcun tipo di investimento.

Per quanto riguarda tutte quelle voci di costo, inerenti alle macchine o a parti di impianto (es: caldaia a pellet, valvola a tre vie, ecc.), che ovviamente variano a seconda del caso preso in esame, sono state ottenute consultando i listini prezzi delle ditte costruttrici.

Mentre per quanto riguarda i prezzi di installazione, sia inerenti alle migliori impiantistiche che a quelle edili, è stata contattata una ditta installatrice. Queste voci non possono essere ritenute attendibili al cento per cento dato che non solo variano da ditta a ditta anche in modo significativo, ma anche perché non è possibile conoscere con assoluta certezza la quantità di materiale necessario alla messa in funzione del nuovo impianto, ne tantomeno se durante le fasi di lavoro sorgeranno dei problemi che comporteranno l'inevitabile innalzamento dei costi. Perciò le voci di costo riguardanti i materiali e la manodopera necessaria all'installazione, non godono di precisione assoluta ma comunque non si discostano eccessivamente dalla realtà.

5.1 Investimenti

5.1.1 Costo Caso 1: Istallazione Caldaia a Pellet e Valvole Termostatiche

La tabella sottostante riporta i principali costi sostenuti per sostituire l'obsoleta caldaia a metano con una più performante caldaia a pellet. Tutti i prezzi contengono già l'imposta sul valore aggiunto.

Tabella 48: Costo Caso 1		
Costo Caldaia FIT E 24 kW (<i>Fonte Ungaro S.r.l</i>)	4300	[€ IVA inclusa]
Costo Istallazione	1500	[€ IVA inclusa]
Costo Raccorderia	300	[€ IVA inclusa]
Costo Camino	3000	[€ IVA inclusa]
Costo Totale Valvole Termostatiche (comprensivo di materiale e installazione - <i>Fonte Caleffi</i>)	990	[€ IVA inclusa]
Caricamento automatico (GEObox G4, coclea flessibile, installazione - <i>Fonte GEOplast</i>)	5000	[€ IVA inclusa]
Costo Accumulo (<i>Fonte Rotex</i>)	1538	[€ IVA inclusa]
COSTO TOTALE INTERVENTO		
	16628	[€ IVA inclusa]

5.1.2 Costo Caso 2: Istallazione Isolamento termico e Valvole Termostatiche

Come descritto nel paragrafo 4.2.3 il materiale isolante, tutto prodotto dalla ditta PAVATEX, è stato posto su tutto il perimetro esterno, su tutto il sottotetto e sul muro del piano terra confinante con il garage, cioè l'unico ambiente non riscaldato.

Come si nota nella tabella sottostante i costi di installazione differiscono dalla superficie considerata in quanto, per la superficie esterna è necessaria l'installazione di un ponteggio, mentre per quella interna è sufficiente una scala o al massimo un impalcatura mobile. I prezzi relativi all'installazione dei pannelli isolanti su queste due pareti sono doppi rispetto al prezzo che si ha per l'installazione nel sottotetto. Questo è dovuto al fatto che, per coibentare la parete esterna e quella confinante col garage, è necessario tener conto di tutto il materiale utile al fissaggio (colla, tassellatura, nastro adesivo, ecc.) e l'intonacatura finale. Specialmente quest'ultima molto incidente sul prezzo. Questa operazione, nel momento in cui si va ad isolare il sottotetto, essendo questo agibile dall'interno dell'abitazione, ma comunque non abitabile, non è più necessaria e anche le operazioni di applicazioni e fissaggio sono più agevoli e veloci con conseguente riduzione dei costi.

Tabella 49: Costo Caso 2							
Superficie coibentata	Nome Pannello	Spessore Isolante [m]	Superficie Isolata [m ²]	Costo Pannello [€/m ²]	Costo Istallazione [€/m ²]	Costo Ponteggio [€/m ²]	Costo Finale [€ IVA inclusa]
Muro esterno	Pavawall	0,12	195,92	39,72	50	10	19537,14
Muro casa/garage	Pavadentro	0,1	27,73	43,71	50	-	2598,58
Solaio	Pavatherm	0,1	102,87	20,80	25	-	4711,45
Costo totale per isolare							26847,17
Costo Totale Valvole Termostatiche (comprensivo di materiale e installazione - <i>Fonte Caleffi</i>)							990
COSTO TOTALE INTERVENTO							27837,17

5.1.3 Costo Caso 3: Istallazione Caldaia a Pellet + Isolamento termico + Valvole Termostatiche

I costi sostenuti per le migliorie impiantistiche, trattandosi della stessa caldaia, sono i medesimi considerati nel paragrafo 5.1.1.

Stesso discorso vale per il materiale isolante, infatti essendo le superfici coibentate le medesime del paragrafo precedente anche i costi saranno gli stessi.

La tabella relativa alle voci di costo di questo caso si limiterà a riportare la somma dei due costi complessivi.

Tabella 50: Costo Caso 3		
Costo Tot. per sostituire caldaia con una a pellet	16628	[€ IVA inclusa]
Costo Tot. per isolare	26847,17	[€ IVA inclusa]
COSTO TOTALE INTERVENTO	43474,17	[€ IVA inclusa]

5.2.4 Costo Caso 4: Istallazione Isolamento termico + Caldaia a condensazione + Valvole termostatiche + Solare termico

I miglioramenti di questo caso sono molteplici. Ad esclusione dell'isolamento di cui si riporta solo il costo complessivo dato che le superfici coibentate sono sempre le stesse (Vedi paragrafo 5.2.2), nella tabella che segue sono riportate le voci di ogni singolo cambiamento.

I materiali utilizzati sono già stati descritti nel paragrafo 4.3.5 per cui non vengono riportate le caratteristiche tecniche ma solo le voci di costo.

Qui oltre al costo di istallazione della caldaia, dobbiamo tener conto anche del costo di istallazione del pannello. Dato che l'abitazione presa in esame è esposta secondo i punti cardinali, e che l'inclinazione del tetto è di circa 20°, non sono necessarie staffe particolari, ma solo quelle normali utili al fissaggio, costo incluso nella voce "Costi Istallazione pannello".

Tabella 51: Costo Caso 4		
Costo Caldaia a condensazione VICTRIX ZEUS 20 (Fonte <i>Immergas</i>)	1200	[€ IVA inclusa]
Costo Istallazione	700	[€ IVA inclusa]
Costo Raccorderia	300	[€ IVA inclusa]
Kit aggiuntivo solaris (Fonte: Rotex)	270	[€ IVA inclusa]
Valvola a tre vie (Fonte <i>Rotex</i>)	123	[€ IVA inclusa]
Costo Totale Valvole Termostatiche (comprensivo di materiale e installazione)	990	[€ IVA inclusa]
Camino	3000	[€ IVA inclusa]
Costo Pannello PLANO 26 (Fonte <i>Consolar</i>)	2400	[€ IVA inclusa]
Costo Istallazione pannello	1000	[€ IVA inclusa]
Costo Raccorderia pannello	500	[€ IVA inclusa]
Costo Accumulo	1538	[€ IVA inclusa]
Costo Tot. Per sostituzione caldaia con una a condensazione e integrazione con solare	12021	[€ IVA inclusa]
Costo Tot. Per isolare	26847,17	[€ IVA inclusa]
COSTO TOTALE INTERVENTO	38868,17	[€ IVA inclusa]

5.1.5 Costo Caso 5: Istallazione Isolamento termico + Pompa di Calore + Valvole Termostatiche + Solare Termico

Anche in quest'ultimo caso le migliorie impiantistiche sono notevoli, cosa che si nota subito dall'elevato costo di intervento. Ciò è principalmente dovuto al fatto che le macchine che si vanno ad installare sono tre: l'unità interna, l'unità esterna e l'accumulo.

Il costo complessivo delle tre macchine è riportato nella voce "Costo Kit Pompa di calore".

Anche il costo di installazione risulta più alto rispetto al caso precedente proprio per la maggiore complessità dell'intervento.

La voce "Costo Raccorderia", presente in tutti i casi, comprende tutti quei raccordi utili al collegamento della pompa di calore, in questo caso, con gli altri organi dell'impianto.

Tabella 52: Costo Caso 5		
Costo Kit Pompa di calore (unità interna, esterna, accumulo) <i>(Fonte: Rotex)</i>	12850	[€ IVA inclusa]
Costo Istallazione	1000	[€ IVA inclusa]
Costo Raccorderia	500	[€ IVA inclusa]
Kit aggiuntivo solaris (Fonte: Rotex)	270	[€ IVA inclusa]
Valvola a tre vie <i>(Fonte Rotex)</i>	123	[€ IVA inclusa]
Costo Totale Valvole Termostatiche (comprensivo di materiale e installazione)	990	[€ IVA inclusa]
Messa in funzione AT	200	[€ IVA inclusa]
Costo Pannelli <i>(Fonte Consolar)</i>	2400	[€ IVA inclusa]
Costo Istallazione pannello	1000	[€ IVA inclusa]
Costo Raccorderia pannello	500	[€ IVA inclusa]
Costo Tot. Per sostituzione caldaia con pompa di calore e integrazione con solare	19833	[€ IVA inclusa]
Costo Tot. Per isolare	26847,17	[€ IVA inclusa]
COSTO TOTALE INTERVENTO	47680,17	[€ IVA inclusa]

5.2 Conto Economico

In questo paragrafo è stato calcolato il consumo annuo caso per caso e successivamente monetizzato. Per fare ciò si sono utilizzati i seguenti parametri:

PCI _{pellet}	5,36	[kWh/kg]
PCI _{gas naturale}	9,8	[kWh/m ³]
Area	173,47	[m ²]

Tabella 53: *Potere Calorifico e Area Abitazione*

Tabella utile a convertire l'Energia Primaria Totale del caso in esame espressa in kWh/m² in Consumo annuo, espresso in un'unità di misura utile alla monetizzazione.

Gas Naturale		
Prezzo gas naturale Centroconsumatori	0,896	[€/m ³]

Tabella 54: *Costo Gas Naturale*

Pellet		
Prezzo pellet	4,5	[€/sacco]
Peso sacco	15	[kg]
N. sacchi per bancale	70	

Tabella 55: *Costo Pellet, Comprensivo di trasporto*

Elettricità		
Coeff. di conversione	0,22	[€/kWh _e]

Tabella 56: *Costo Elettricità*

Tutti i prezzi riportati nelle tabelle 54 – 55 – 56 sono comprensivi di IVA.

5.2.1 Zona Climatica E

Conto Economico						
Casi di studio		En. Primaria Totale EP _{TOT} [kWh/m ²]	Consumo Annuo	Costo di Approvv. CA [€/anno]	Risparmio Annuo RA [€/anno]	Pay Back PB [anni]
Caso 0	Caso di riferimento	297,84	5272,05 $\left[\frac{m^3}{anno}\right]$	4723,76	0	0
Caso 1	Pellet	76,09	2462,46 $\left[\frac{kg}{anno}\right]$	738,74	3985,02	4,17
Caso 2	Isolamento	192,94	3415,22 $\left[\frac{m^3}{anno}\right]$	3060,03	1663,73	16,73
Caso 3	Isolam. + pellet	47,13	1525,28 $\left[\frac{kg}{anno}\right]$	457,58	4266,18	10,19
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	120,44	2131,92 $\left[\frac{m^3}{anno}\right]$	1910,20	2813,56	13,81
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	73,89	12817,39 $\left[\frac{kWh_e}{anno}\right]$	2819,83	1903,94	24,52

Tabella 57: Consumo, Risparmio, PayBack Zona Climatica E

5.2.2 Zona Climatica F

Conto Economico						
Casi di studio		En. Primaria Totale EP _{TOT} [kWh/m ²]	Consumo Annuo	Costo di Approvv. CA [€/anno]	Risparmio Annuo RA [€/anno]	Pay Back PB [anni]
Caso 0	Caso di riferimento	2381,37	6750,58 $\left[\frac{m^3}{anno}\right]$	6048,52	0	0
Caso 1	Pellet	99,81	3230,28 $\left[\frac{kg}{anno}\right]$	818,34	5230,18	3,18
Caso 2	Isolamento	248,79	4403,91 $\left[\frac{m^3}{anno}\right]$	3945,90	212,62	13,24
Caso 3	Isolam. + pellet	60,24	1949,62 $\left[\frac{kg}{anno}\right]$	493,90	5554,61	7,83
Caso 4	Isolam. + cond. + solare	157,02	2779,46 $\left[\frac{m^3}{anno}\right]$	2490,39	3558,12	10,92
Caso 5	Isolam. + pomp. + solare	11,94	19418,28 $\left[\frac{kWh_e}{anno}\right]$	4276,02	1776,49	26,28

Tabella 58: Consumo, Risparmio, PayBack Zona Climatica F

Le ultime due colonne delle tabelle precedenti sono state ricavate come segue:

$$\text{Risparmio Annuo} = RAn = CA \text{ Caso } 0 - CA \text{ Caso } n \quad \left[\frac{\text{Euro}}{\text{Anno}} \right]$$

Dove: $n = 1, 2, 3, 4, 5$

$$\text{PayBack} = PB = \frac{RAn}{I} \quad [\text{anni}]$$

Dove: I = indica il costo totale dell'intervento indicato nelle tabelle da 49 a 52, a seconda del caso che si va a considerare

Il **PayBack**, o **Tempo di Recupero**, è un valore utile a dare semplicemente un'idea sul tempo necessario a rientrare dell'investimento effettuato. Non è però ritenuto molto attendibile dato che il tempo non viene attualizzato.

5.3 Valore Attuale Netto – VAN

Dato la scarsa affidabilità, o meglio la poca accuratezza del Tempo di Recupero, per valutare la bontà di un investimento si predilige l'utilizzo del Valore Attuale Netto (VAN) di cui si riporta di seguito la formula:

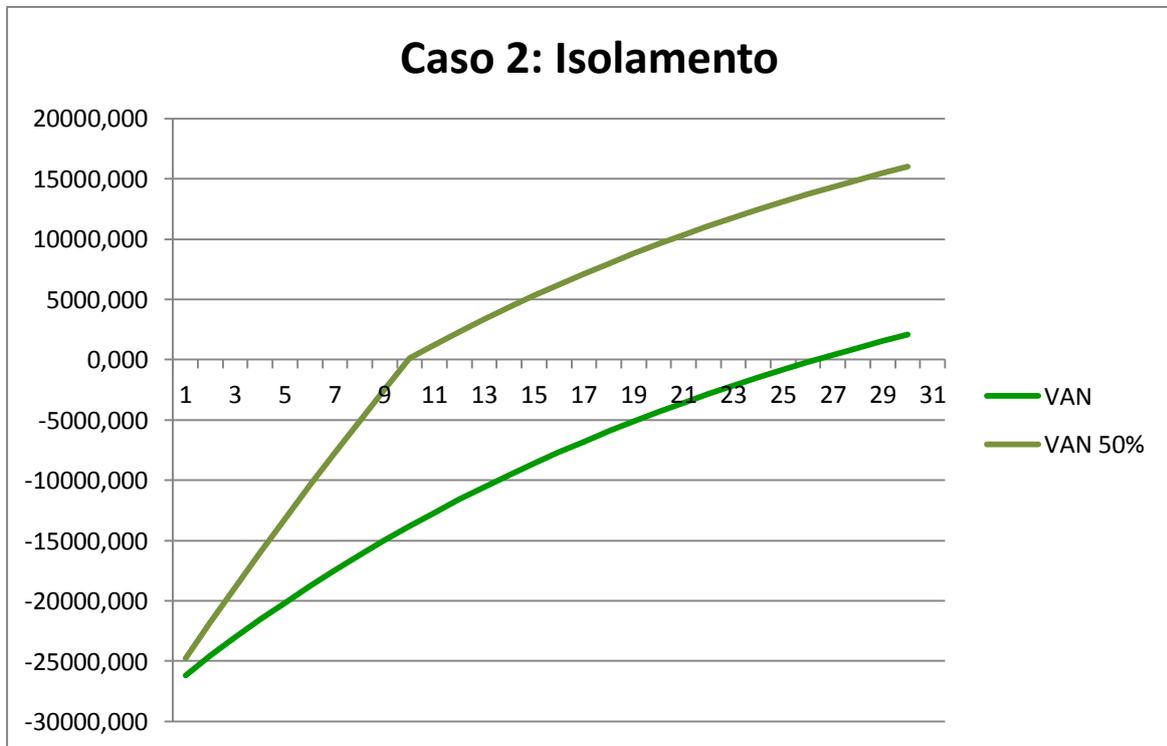
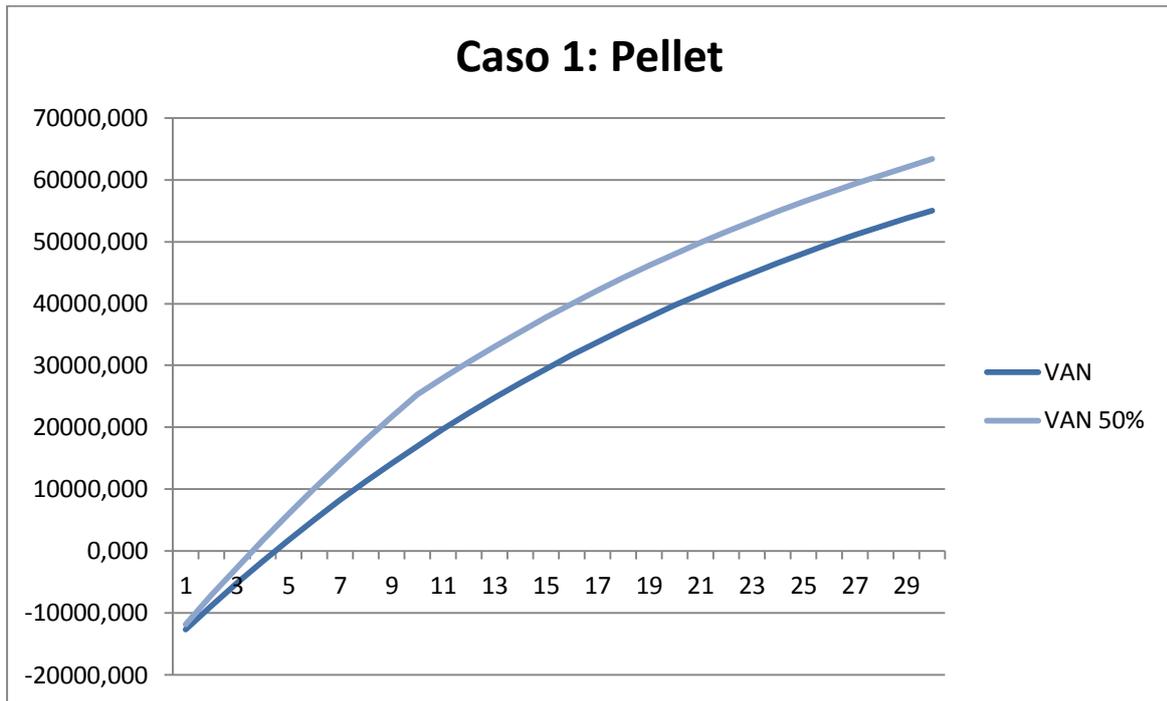
$$VAN = RA * \sum_0^n \frac{1}{(1+i)^n} - I_0$$

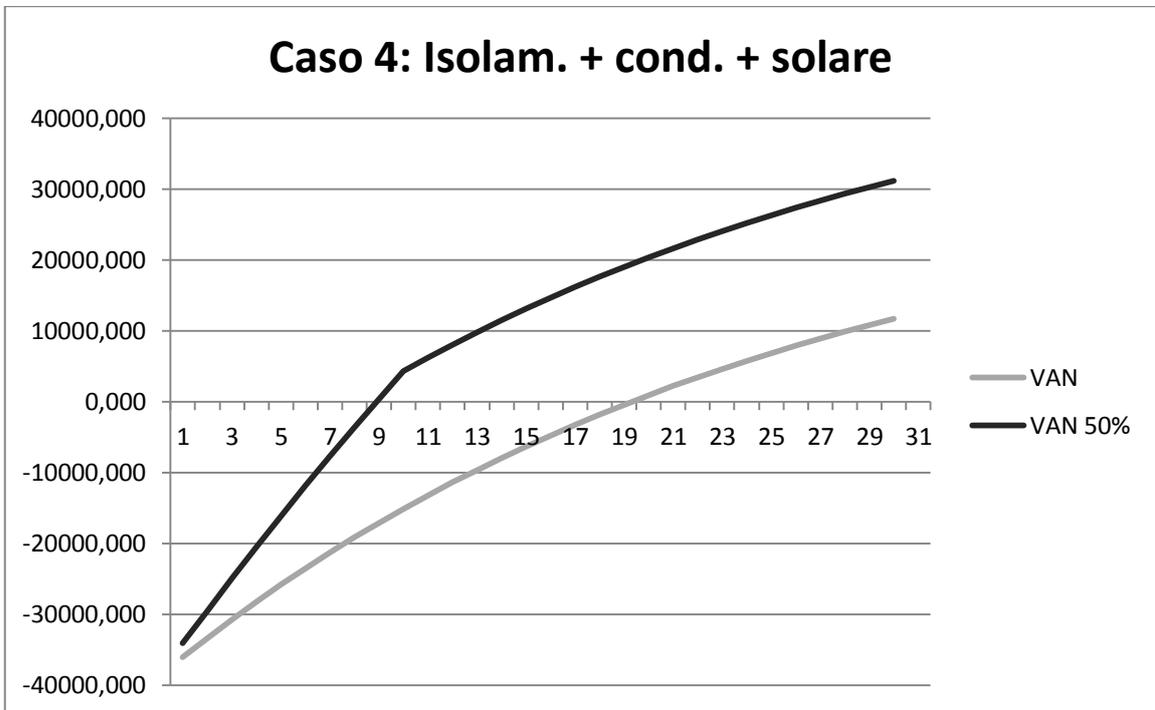
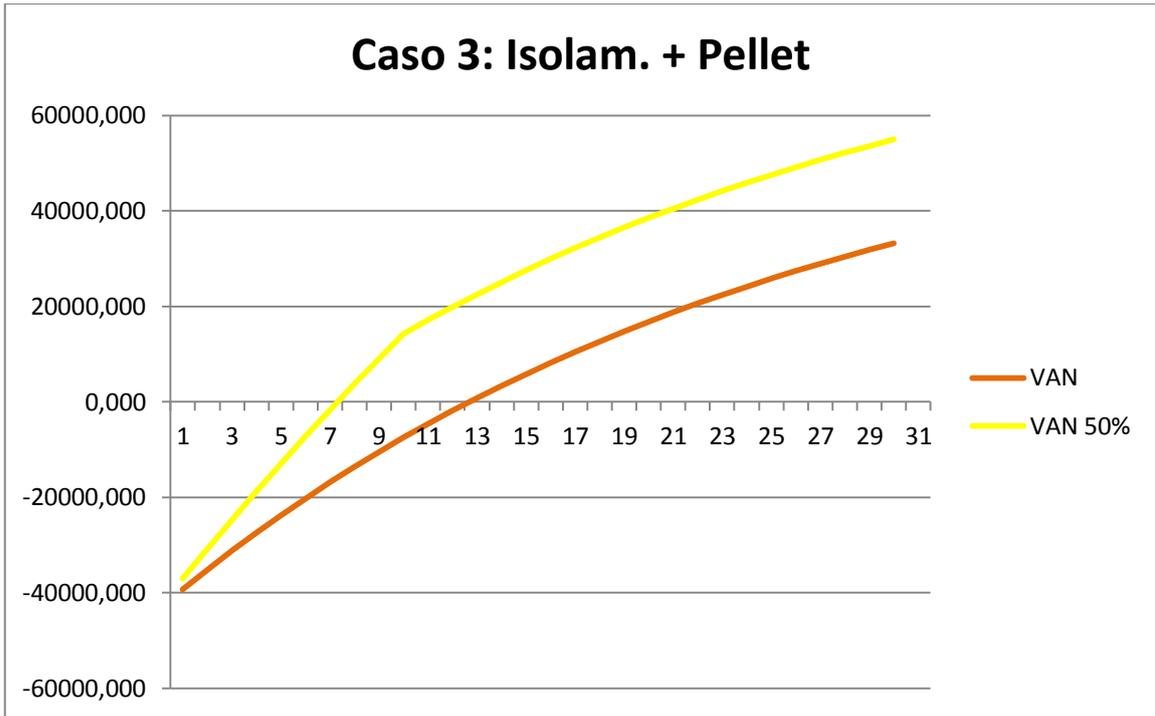
Dove:

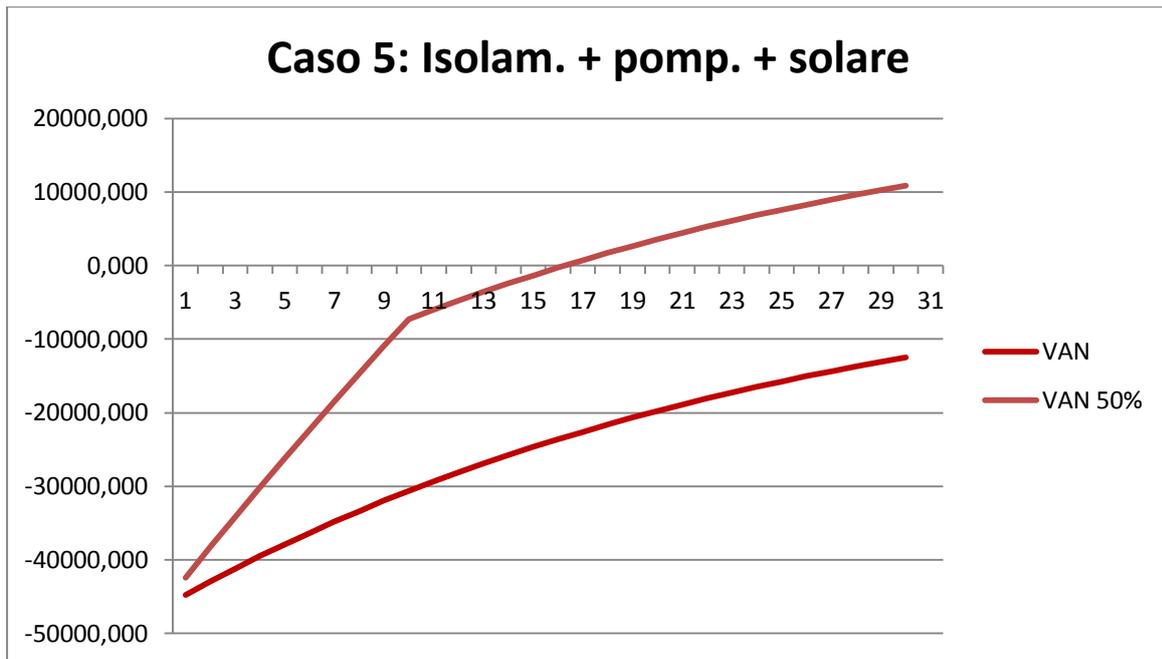
- La sommatoria indica il fattore di attualizzazione;
- i : Tasso di Attualizzazione: Imposto pari a 0,04;
- I_0 : Investimento iniziale: Coincide con il costo totale dell'intervento indicato nelle tabelle da 49 a 52
- n : 1,...,30

Dato la reiterazione del processo di calcolo ci si limita a riportare i grafici esplicativi per le due zone climatiche. In tali grafici sono presenti due linee in quanto, una linea, denominata per ogni caso VAN, indica il Valore Attuale Netto valutato con la formula precedente mentre l'altra, indicata per ogni caso VAN50%, indica il Valore Attuale Netto valutato tenendo conto della detrazione fiscale al 50% per i primi 10 anni. La legge infatti prevede un rimborso del 50% dell'investimento (55% in realtà, ma scade a giugno per cui è stato volutamente considerato più basso) per interventi di riqualificazione energetica, restituito nell'arco di 10 anni. Quindi dovrà tener conto di un ulteriore ricavo, dato dalla restituzione di un 5% dell'investimento iniziale ogni anno per i primi dieci anni.

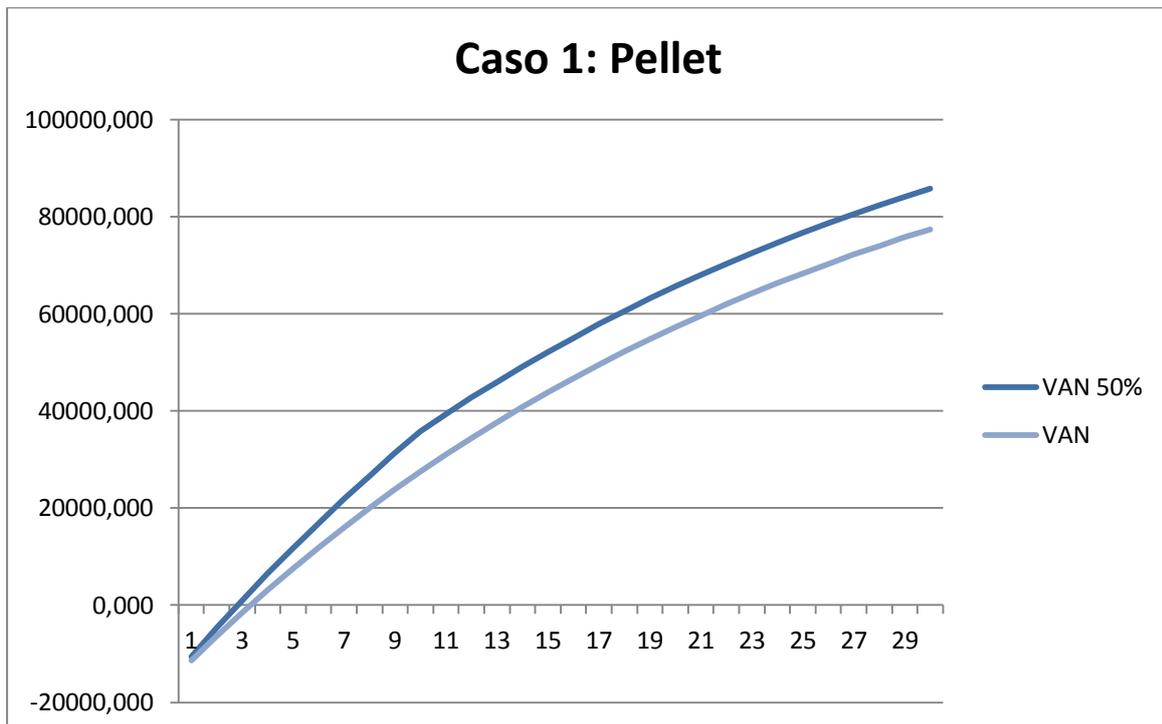
5.3.1 Grafici VAN zona climatica E

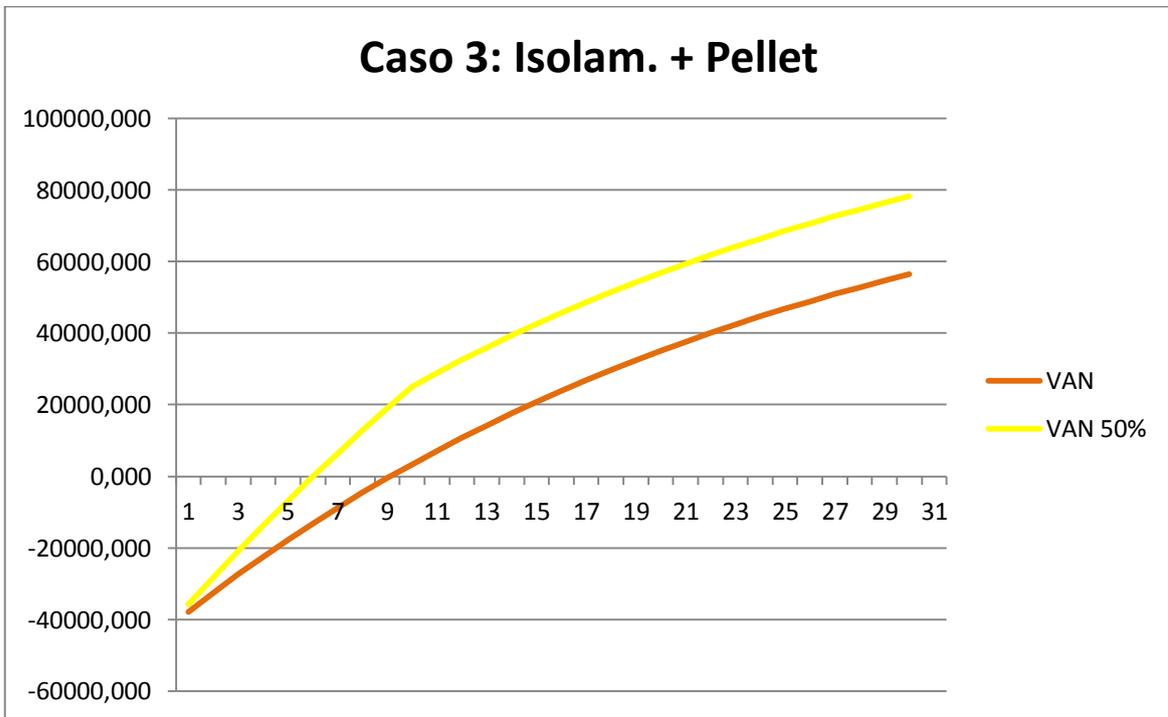
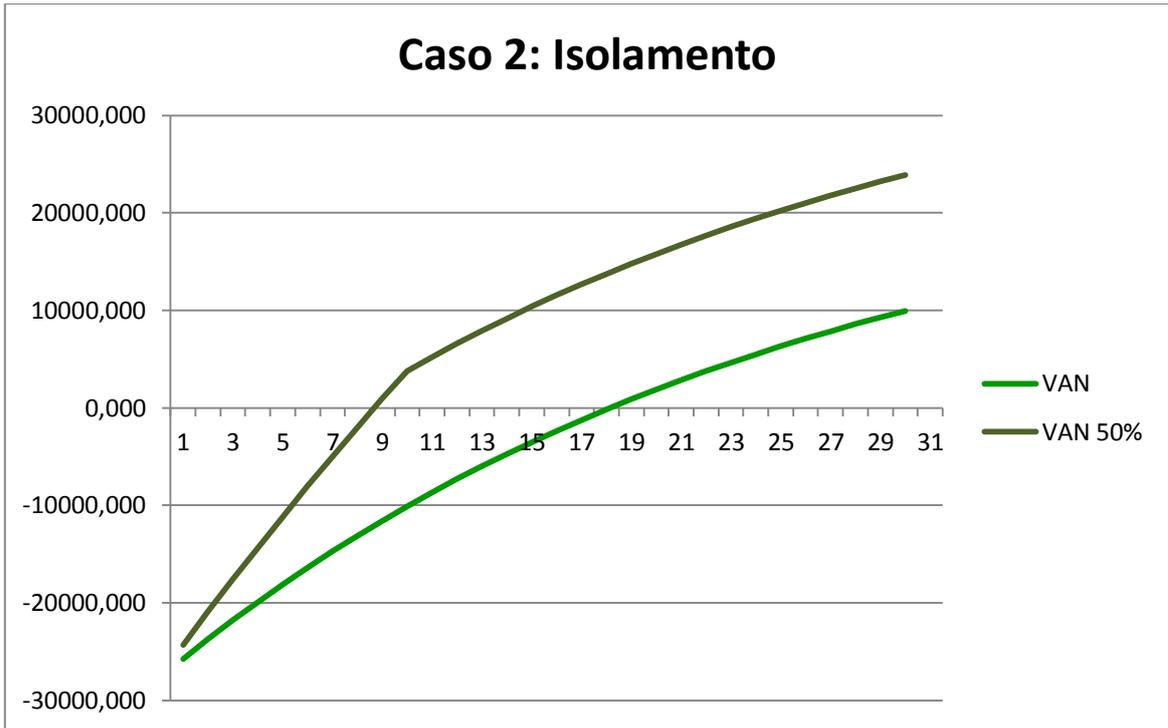




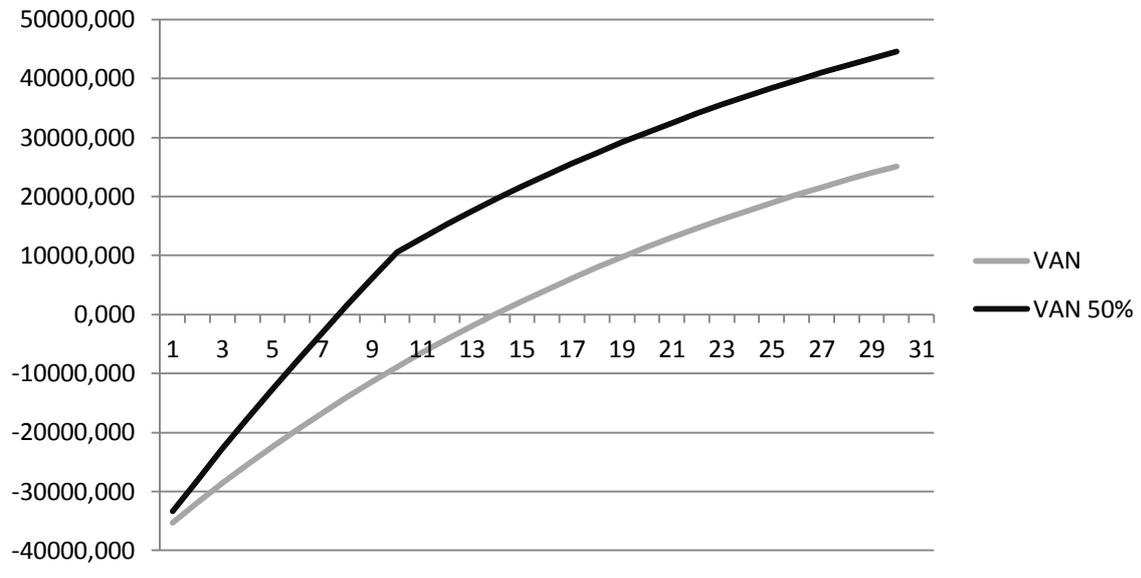


5.3.2 Grafici VAN zona climatica F

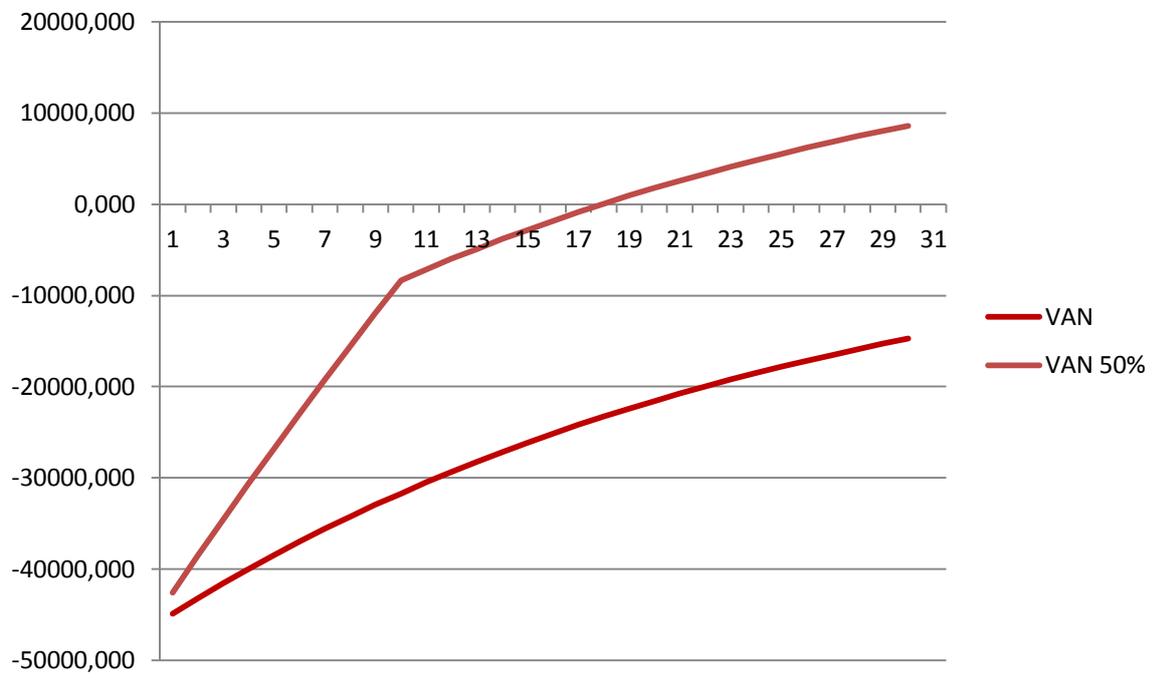




Caso 4: Isolam. + cond. + solare



Caso 5: Isolam. + pomp. + solare



5.3.3 Conclusioni

I grafici risultano molto simili per zona E ed F. Non considerando il caso 1, che mostra tempi di ritorno brevissimi e guadagni buoni indipendentemente che ci sia l'agevolazione fiscale o meno, si nota come la curva con detrazione sia notevolmente più pendente della curva senza detrazione. Ovviamente tale pendenza è maggiore solo nei primi 10 anni, cosa resa particolarmente visibile dato che la curva "VAN 50%" risulta essere quasi una spezzata.

Grazie all'incentivo i tempi di recupero vengono praticamente dimezzati portando ad un guadagno finale cospicuo.

In particolare si nota che la pompa di calore, abbinata ad un sistema a cappotto, senza la detrazione fiscale non permetterebbe un rientro dell'investimento. Quindi nonostante sia la tecnologia "più verde", come spiegato nel paragrafo 4.7, non risulta economicamente conveniente se non sostenuta.

La tecnologia che fornisce il miglior compromesso sia ambientale che economico risulta quindi essere l'isolamento a cappotto abbinato ad una caldaia a Pellet.

6. NORMATIVE

- **NORMA UNI EN ISO 6946:2008: COMPONENTI ED ELEMENTI PER EDILIZIA - RESISTENZA TERMICA E TRASMITTANZA TERMICA - METODO DI CALCOLO.**

La norma fornisce il metodo per il calcolo della resistenza termica e della trasmittanza termica dei componenti e degli elementi per edilizia, escluse le porte, le finestre e altre parti vetrate, le facciate continue, i componenti che implicano uno scambio termico con il terreno ed i componenti percorsi dall'aria di ventilazione;

- **NORMA UNI 10351:1994: MATERIALI DA COSTRUZIONE – CONDUTTIVITA' TERMICA E PERMEABILITA' AL VAPORE.**

Integra, con i dati di permeabilità al vapore, i dati di conduttività termica dei materiali impiegati nell'edilizia, precedentemente riportati nel FA 101- 83 "Valori correnti della conduttività di alcuni materiali alla temperatura ordinaria" che sostituisce il punto 7.1.2 della norma UNI 7357 (1974). I valori già contenuti nel FA 101-83 vengono qui ripresi senza alterazioni. La presente norma è pubblicata a supporto della UNI 1034. Fornisce i valori di conduttività termica di permeabilità dei materiali da costruzione. Deve essere impiegata quando non esistano norme specifiche per il materiale considerato.

- **NORMA UNI EN ISO 10456:2008: MATERIALI E PRODOTTI PER EDILIZIA – PROPRIETÀ IGROMETRICHE – VALORI TABULATI DI PROGETTO E PROCEDIMENTO PER LA DETERMINAZIONE DEI VALORI TERMICI DICHIARATI E DI PROGETTO.**

La norma specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali e prodotti per l'edilizia termicamente omogenei. Fornisce inoltre i procedimenti per convertire i valori ottenuti per un insieme di condizioni in quelli validi per un altro insieme di condizioni. Questi procedimenti sono validi per temperature ambiente di progetto comprese tra -30 °C e +60 °C. La norma fornisce coefficienti di conversione per temperatura e umidità. Tali coefficienti sono validi per temperature medie tra 0 °C e 30 °C. La norma fornisce inoltre valori di progetto tabulati che possono essere utilizzati nei calcoli di trasferimento di calore e umidità per materiali termicamente omogenei e prodotti comunemente utilizzati nella costruzione degli edifici.

➤ **NORMA UNI EN ISO 13786:2001: *PRESTAZIONE TERMICA DEI COMPONENTI PER EDILIZIA – CARATTERISTICHE TERMICHE DINAMICHE – METODI DI CALCOLO.***

La norma definisce metodi per il calcolo del comportamento termico in regime dinamico di componenti edilizi completi. Inoltre essa specifica quali siano le informazioni sul componente edilizio necessarie per il calcolo. Nelle appendici sono forniti metodi semplificati per la stima delle capacità termiche, informazioni per informatizzare il metodo di calcolo, un esempio di calcolo per un componente edilizio.

➤ **NORMA UNI EN ISO 13788:2003: *PRESTAZIONE IGROMETRICA DEI COMPONENTI E DEGLI ELEMENTI PER EDILIZIA – TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA PER EVITARE L'UMIDITA' SUPERFICIALE E CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE – METODO DI CALCOLO.***

La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN ISO 13788 (edizione luglio 2001). La norma definisce un metodo di riferimento per determinare la temperatura superficiale interna minima dei componenti edilizi tale da evitare crescita di muffe, in corrispondenza a valori prefissati di temperatura e umidità relativa interna; il metodo può essere anche utilizzato per la previsione del rischio di altri problemi di condensazione superficiale. Inoltre viene indicato il metodo per la valutazione del rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo e le relative condizioni al contorno da utilizzare nei calcoli. Il metodo usato assume che l'umidità da costruzione si sia asciugata e non tiene conto di altri fenomeni fisici (risalita capillare, variazione con l'umidità dei parametri, termofisica, ecc.).

➤ **NORMA UNI EN ISO 14025:2010: *ETICHETTE E DICHIARAZIONI AMBIENTALI – DICHIARAZIONI AMBIENTALI DI TIPO III – PRINCIPI E PROCEDURE.***

La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese e italiana della norma europea EN ISO 14025 (edizione maggio 2010). I contenuti della presente norma sono equivalenti ai contenuti della UNI ISO 14025:2006. La necessità di ripubblicare la norma è dovuta all'adozione da parte del CEN della ISO 14025:2006 come norma europea. La norma stabilisce i principi e specifica le procedure per lo sviluppo delle dichiarazioni ambientali di Tipo III e dei programmi corrispondenti. Essa specificatamente stabilisce l'utilizzo delle norme della serie ISO 14040 per lo sviluppo delle dichiarazioni ambientali di Tipo III e dei programmi corrispondenti. La norma stabilisce i principi relativi all'utilizzo delle informazioni ambientali in aggiunta a quelli forniti dalla UNI EN ISO 14020.

➤ **NORMA UNI EN ISO 14040:2006: GESTIONE AMBIENTALE – VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA – PRINCIPI E QUADRO DI RIFERIMENTO.**

La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 14040 (edizione luglio 2006). La norma descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA), comprendendo:

- a) la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'LCA;
- b) la fase di inventario del ciclo di vita (LCI);
- c) la fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA);
- d) la fase di interpretazione del ciclo di vita;
- e) la rendicontazione e la revisione critica dell'LCA;
- f) le limitazioni dell'LCA;
- g) le correlazioni tra le fasi dell'LCA;
- h) le condizioni per l'utilizzo delle scelte dei valori e degli elementi facoltativi.

La norma tratta gli studi di valutazione del ciclo di vita (LCA) e di inventario del ciclo di vita (LCI). La norma non descrive in dettaglio la tecnica di valutazione del ciclo di vita e non specifica metodologie per le singole fasi dell'LCA.

➤ **NORMA EN ISO 14683:2008: PONTI TERMICI IN EDILIZIA – COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE TERMICA LINEICA – METODI SEMPLIFICATI E VALORI DI RIFERIMENTO.**

La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 14683 (edizione dicembre 2007). La norma specifica dei metodi semplificati per la determinazione del flusso di calore attraverso i ponti termici lineari che si manifestano alle giunzioni degli elementi dell'edificio. La norma specifica i requisiti relativi ai cataloghi dei ponti termici e ai metodi di calcolo manuali. L'appendice A (informativa) riporta valori di riferimento della trasmittanza termica lineica.

➤ **DIN: Deutsches Institut für Normung:** Istituto tedesco per la standardizzazione, è una organizzazione tedesca per la definizione di standard. Fondata nel 1917 col nome di Normenausschuss der deutschen Industrie (Associazione per gli standard dell'industria tedesca) e poi ribattezzata prima nel 1926 e poi nuovamente nel 1975. Nel 1951 diventa membro dell'International Organization for Standardization (ISO) e nel 1975, in seguito ad accordi col governo della Germania Ovest viene riconosciuta come ente per gli standard nazionali tedeschi.

- **DIN 51731:** Norma per giudicare la qualità del pellet.

In realtà, nella versione in vigore è solamente in parte adatta a giudicare la qualità e l'idoneità del pellet. Questo sia per i valori limite molto generosi

che lasciano a disposizione del produttore uno spettro dei singoli parametri molto ampio, sia per la mancanza di controlli esterni sul pellet.

- **DIN PLUS:** Certificazione per il pellet rilasciata dal DIN CERTCO l'istituto di certificazione del TÜV Rheinland Gruppe e del DIN, l'istituto tedesco per le normative (Deutscher Institut für Normung), e grazie alla sua indipendenza, gode di una buona popolarità in tutto il mondo.



Con il test e la certificazione del pellet tra le altre cose, le proprietà di alta qualità durante la produzione di pellets sono testati e fissati. I test di prodotto vengono eseguiti da personale qualificato e riconosciuti dai laboratori di prova di DIN CERTCO. Il contenuto della prova dei pellet di legno per esempio comprende proprietà quali:

Contenuto d'acqua,
Densità,
Abrasione.

Una ulteriore caratteristica che è determinata durante il collaudo del prodotto è la temperatura di fusione delle ceneri. È una caratteristica rilevante per stimare la formazione di "pietra ash". Per ottenere il marchio di qualità vengono effettuati controlli a campione dal momento della produzione.

Dopo la positiva valutazione della DIN CERTCO viene rilasciato il certificato, il quale è valido per 5 anni. Il certificato può essere rinnovato per ulteriori 5 anni finché la sorveglianza è effettuata con risultati positivi.

Valori di norma		
Parametro	DINplus	Unità di misura
Diametro	4 -10	[mm]
Lunghezza	<5*d	[mm]
Potere calorifico	18	[MJ/kg]
Potere calorifico	5,5	[kWh/kg]
Resistenza all'abrasione	<2,3	%
Peso specifico	>1,12	[Kg/dm ³]
Percentuale ceneri	<0,5	%
Umidità residua	<10	%
Percentuale zolfo	<0,04	%
Percentuale cloro	<0,02	%
Percentuale azoto	<0,30	%
Controlli esterni	si	
Adittivi di pressatura	<2	%
Controllo	no	

➤ **CERTIFICAZIONE FSC:** La certificazione FSC è un certificazione internazionale, indipendente e di parte terza, specifica per il settore forestale e i prodotti - legnosi e non legnosi - derivati dalle foreste.

Esistono due tipologie di certificazione FSC:

- **GESTIONE FORESTALE:** per proprietari e gestori forestali;
- **CATENA DI CUSTODIA:** per imprese di trasformazione e/o commercio di prodotti forestali.

Le aziende certificate FSC sono autorizzate a usare i marchi FSC nel rispetto delle procedure e degli standard esistenti.



The mark of responsible forestry

Cert no. SGS-COC-005371
© 1996 Forest Stewardship Council

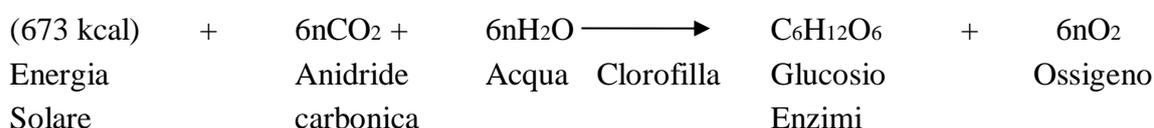
7. APPROFONDIMENTI

7.1 Energia solare e fotosintesi

La fotosintesi è il processo biochimico che permette alle piante di utilizzare l'energia irradiata dal sole (fotoni) per fabbricare le molecole complesse (glucidi) che sono alla base di tutta la materia vivente. Questa costruzione è basata sulla trasformazione dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera e sulla scissione fotolitica dell'acqua, al fine di ottenere l'idrogeno necessario alla reazione.

La fotosintesi dà come sottoprodotto l'ossigeno, l'elemento indispensabile alla vita.

Chimicamente, questa bioconversione (trasformazione energetica basata su un processo vivente e, per estensione, tutte le tecniche che producono energia partendo dalla materia vivente) può essere così rappresentata:



Va notato che questo processo avviene solo nelle piante e nelle alghe verdi, che sono gli unici essere viventi autotrofi, in grado cioè costruirsi da soli i composti organici necessari al proprio sviluppo a partire da materiale inorganico (CO₂ e H₂O) ed energia solare. I vegetali posseggono infatti molecole di un composto capace di captare l'energia solare – la clorofilla – e gli enzimi necessari alla trasformazione del glucoside in molecole ancora più complesse.

Ma poiché in natura non vi sono cicli aperti, con solo assorbimento di energia, una parte dell'energia captata verrà poi liberata in successive trasformazioni con produzione di anidride carbonica e acqua (vedi la respirazione).

In pratica il ciclo, è il seguente, anche se in realtà è più complesso:

L'energia della luce viene captata dalla clorofilla e trasformata in energia chimica che permette la fabbricazione del glucosio, elemento base per le successive trasformazioni che possono essere:

- Organiche: come la produzione di amidi, di cellulosa, di lipidi e di proteine;
- Inorganiche: come la produzione di anidride carbonica o acqua nei processi di traspirazione, respirazione ecc.

I sottoprodotti derivati dall'utilizzo della sostanza organica oppure i rifiuti o i residui non utilizzati (piante morte, ad esempio) vengono trasformati in successivi processi sia in molecole organiche sia in composti organici (come il petrolio o i carbonati minerali).

Il ciclo naturale è sempre chiuso e equilibrato, ed esaminandolo sommariamente si possono fare due considerazioni importanti:

- Le piante o le alghe verdi sono i principali produttori di ossigeno necessario ad ogni essere vivente; basti pensare che grazie a loro in 550 milioni di anni la

percentuale di ossigeno nell'atmosfera è passata dall'1% all'attuale 20%, permettendo lo sviluppo di altre forme di vita sulla terra, tra cui l'uomo. Senza di essi, ai ritmi attuali, l'aumento del tasso di anidride carbonica sarebbe tale da far scomparire ogni forma di vita in 2000 anni;

- Dalla sintesi clorofilliana dipende il ciclo di un altro elemento base per ogni essere vivente: il carbonio (C), che interviene nella totalità o quasi dei composti organici che rappresentano per ogni essere vivente, in quanto eterotrofo, cioè incapace di costruirsi da solo le molecole organiche necessarie, la fonte diretta di energia. È, infatti, mediante l'alimentazione diretta o indiretta che gli organismi animali o umani assorbono i composti organici e li utilizzano. Anche in tal caso questo tipo di bioconversione libera energia e produce sottoprodotti con un contenuto energetico ancora utilizzabile.

In sostanza è grazie all'energia solare raccolta da questa enorme fucina che sono i campi, le foreste, le alghe verdi, che il ciclo avviene senza interruzioni e di continuo viene alimentato di energia. Quindi tutte le forme organiche sono vettori di energia solare: essa è captata dalla fotosintesi e liberata dopo un certo numero di conversioni e di accumuli.

7.2 Metodo di Glaser

Per studiare i fenomeni di condensazione del vapore all'interno delle strutture edilizie (pareti, solette, ecc.) si utilizza il metodo di Glaser. Il metodo consente, fissate le condizioni termoisometriche interne ed esterne, di verificare se in una struttura piana, supposta inizialmente asciutta, possa verificarsi condensazione di vapore. La formazione di condensa non pregiudica l'idoneità della struttura, purché si dimostri che la quantità complessiva di condensa, alla fine del periodo invernale di condensazione sia in assoluto $Q_c \leq 500 \text{ [g/m}^2\text{]}$, non ecceda limiti quantitativi $Q_c \leq Q_{amm}$ caratteristici dei diversi materiali interessati e che il bilancio annuale effettuato conteggiando la condensa Q_c che può evaporare nella restante parte dell'anno (periodo di evaporazione) sia $Q_c + Q_e \leq 0$ (in altre parole la condensa invernale deve poter asciugare completamente nell'arco dell'anno). In sintesi una struttura è idonea se:

$$\begin{aligned} Q_c &\leq 500 \text{ g/m}^2 \\ Q_c &\leq Q_{amm} \\ Q_c + Q_e &\leq 0 \end{aligned}$$

Valori indicativi di Q_{amm} da stabilirsi in relazione al materiale sono riportati nella seguente tabella ripresa dalla UNI EN ISO 13788. "L" rappresenta lo spessore dello strato di materiale interessato alla condensa e "p" la sua densità.

Materiale	Densità [kg/m³]	Q_{amm} [g/m²]
Laterizi	600 – 2000	≤ 500
Calcestruzzi	400 – 2400	≤ 500
Legnami e derivati	500 – 800	≤ 30 * ρ * L
Intonaci e malte	600 - 2000	≤ 30 * ρ * L
Fibre di natura organica: Con collanti resistenti all'acqua	300 – 700	≤ 20 * ρ * L
Con collanti non resistenti all'acqua	300 – 700	≤ 5 * ρ * L
Fibre minerali	10 – 150	≤ 5000 * ρ * L * [λ/(1-1.7λ)]
Materie plastiche cellulari	10 – 80	≤ 5000 * ρ * L * [λ/(1-1.7λ)]

Se le condizioni descritte non risulteranno verificate la struttura non risulterà accettabile e il progettista dovrà modificarla fino a verifica positiva.

7.3 EPD

Environmental Product Declaration (EPD): la quantificazione del contenuto di energia primaria di un prodotto sarà prossimamente dichiarata in una parte della dichiarazione ambientale ISO Tipo III (Environmental Product Declaration): una dichiarazione che facendo riferimento alla ISO 14025 “Dichiarazioni e marcature ambientali” sarà compilata da un ente certificatore terzo sulla base delle informazioni fornite dal produttore. La normativa stabilisce i criteri standardizzati della certificazione ambientale, assicurando in questo modo per ogni materiale una descrizione completa e tracciabile di tutti gli effetti ambientali più importanti. Per consentirne la comparazione, i prodotti sono stati catalogati in gruppi. In Germania fino ad oggi sono stati messi a punto i seguenti gruppi:

- Metalli da costruzione;
- Lame minerali – materiali isolanti;
- Materiali a base di legno;
- Silicato di calcio;
- Calcestruzzo alveolare;
- Isolanti a base di silicato di calcio;
- Inerti leggeri;
- Malte minerali;
- Condotti impiantistici in metallo.

8. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- 1) Guglielmo Giordano – Tecnica delle costruzioni in Legno. Caratteristiche, qualificazione e normazione dei legnami da costruzione. Progettazione e controllo delle strutture lignee tradizionali. Applicazione dei moderni metodi di calcolo alle nuove tipologie costruttive. Classi di resistenza dei legnami strutturali, secondo la normativa europea. – Biblioteca tecnica Hoepli;
- 2) Regione Piemonte – Pellet ad uso energetico: ostacoli e prospettive della filiera e del mercato (2002) – a cura di Vittorio Bosser-Peverelli e Bianca Ventura Assessorato Agricoltura, Qualità e Ambiente – direzione Territoriale Rurale;
- 3) Regione Piemonte – L'energia del Legno: nozioni, concetti e numeri di base (2004) – a cura di V. Francescato, E. Antonini, G. Mezzalana Assessorato Politiche per la montagna, foreste e beni ambientali;
- 4) Regione Piemonte – L'utilizzo del Legno come fonte di calore, IPLA (2003) – Assessorato all'ambiente, Agricoltura e Qualità. Settore Programmazione e Risparmio in Materia Energetica;
- 5) Gian Luca Baldo, Massimo Marino, Stefano Rossi – Analisi del ciclo di vita LCA. Gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi. – Manuale di progettazione sostenibile;
- 6) T. Gallauziaux D. Fedullo, Edizione italiana a cura di F. Barutti e L. Montini – Manuale pratico dell'isolamento termico e acustico – Sistemi Editori;
- 7) Hegger Fuch, Stark Zeumer – Atlante della sostenibilità – UTET scienze tecniche;
- 8) C. Bianchi, U. Bielli, E. Pedrocchi – L'isolamento termico negli edifici – Clup;
- 9) Peter Erlacher, Ruben Erlacher – CasaClima in muratura massiccia, Un manuale – RAETIA;
- 10) CER Comitato per l'Edilizia Residenziale – Uso del legno in edilizia – Quaderni del segretariato generale;
- 11) Cristina Benedetti – Risanare l'esistente, soluzioni per il comfort e l'efficienza energetica – Bolzano University;
- 12) Theodor Hugues, Ludwig Steiger, Johann Weber, Edizione italiana a cura di Enrico De Angelis – Legno – UTET scienze tecniche;
- 13) Alessandro Fasse, Laura Maina – L'isolamento ecoefficiente, guida all'uso dei materiali naturali – Manuale di progettazione sostenibile;
- 14) <http://www.pellet.it>;
- 15) www.impattozero.it sito del progetto impatto zero lifegate;
- 16) www.lifegate.it sito della piattaforma italiana per il mondo eco-culturale;
- 17) www.iso.org sito dell'International Organization for Standardization;
- 18) <http://lca.rjc.ec.europa.eu> sito della piattaforma europea dell'LCA;
- 19) www.minambiente.it sito del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare;
- 20) www.studiolce.it sito dello studio ingegneri associati Life Cycle Engineering;

- 21) www.terna.it l'utility elettrica responsabile in Italia della trasmissione e del dispacciamento dell'energia elettrica sulla rete a alta e altissima tensione su tutto il territorio nazionale;
- 22) <http://www.unep.org/themes/climatechange> una risorsa di informazione sui cambiamenti climatici;
- 23) www.wbcsd.org sito del World Business Council for Sustainable Development, un consorzio per lo sviluppo sostenibile;
- 24) www.iea.org sito dell'Agenzia Internazionale per l'Energia;
- 25) www.fsc-italia.it sito della sezione italiana della Forest Stewardship Council, org. Internazionale che promuove l'etichettatura di legnami proveniente da foreste ambientalmente e socialmente sostenibili;
- 26) www.assobeton.it sito dell'associazione Nazionale Industrie Manifatti Cementizi;
- 27) www.envindec.com sito internazionale della dichiarazione ambientale di prodotto;
- 28) <http://it.wikipedia.org/wiki/Legno>;
- 29) <http://www.altoadige-suedtirol.it/guide/legno/abeterosso.php>
- 30) <http://www.biemmeenergia.it/pellet-abete-rosso-detail.html>
- 31) <http://www.tatano.com/74/3/Segatura/>

RINGRAZIAMENTI

*Le persone da ringraziare sono davvero molte.
Scrivere questo “capitolo”, se così si può definire, senza dimenticare nessuno risulta
quasi più difficile che scrivere l'intera tesi.
In primis ovviamente voglio ringraziare i miei Genitori, per essere stati un punto di
riferimento costante nella mia vita,
anche in quei momenti in cui ammetto di non aver meritato tutte quelle attenzioni,
per avermi ascoltato, consigliato e permesso di arrivare fino a qui.
Voglio ringraziare poi
mia Sorella e mio Cognato, proprio per il rapporto fraterno che ho con loro;
mio Nipote, per le tante risate che mi regala ogni giorno;
I compagni di corso, che hanno reso questo percorso di studi più leggero;
Gli amici di sempre, per aver reso possibile il cosiddetto “staccare la spina” e insieme a
loro gli amici della palestra, e del bar...
La mia ragazza, per essermi stata vicina costantemente in questo periodo ben poco
rilassante e avermi aperto un mondo che non conoscevo ma che spero di continuare a
scoprire insieme a lei;
I sui genitori, nonni e fratelli, per avermi accolto in casa loro
e farmi sempre sentire a mio agio;
Un ringraziamento particolare va al padre
Per aver messo a disposizione le conoscenze sue e dei colleghi.
Ringrazio poi tutte quelle ditte e persone che hanno dedicato parte del loro tempo per
rispondere alle mie continue mail o domande
Infine, per ultimo, ma non per ordine di importanza,
voglio ringraziare immensamente il mio relatore,
il Professor Michele De Carli,
per la disponibilità, i consigli e il tempo che mi ha dedicato,
oltre che per l'argomento molto interessante che mi ha fornito e per
il rapporto, che azzardo a definire amichevole, che si è creato.*

GRAZIE davvero di cuore a tutti...