

Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia, Simone De Cristofaro - Politecnico di Torino
Giuseppe Stivala, Paola Marchiò - CDM DOLMEN Srl

La valutazione del grado di difformità di due strutture in c.a.

Il grado di difformità (GDD) è un parametro che attesta il livello di vulnerabilità di una struttura in c.a. espresso in termini di quantità di armatura longitudinale mancante rispetto alla progettazione strutturale eseguita osservando le disposizioni della normativa vigente [1].

Al giorno d'oggi, il tema della vulnerabilità sismica degli edifici, intesa come la propensione di una costruzione a subire un determinato livello di danno a seguito di un fenomeno sismico di data intensità, è particolarmente attuale. La diversificazione delle tipologie costruttive presenti sul territorio italiano e la mancanza di un vero e proprio database che possa contenere informazioni accurate sul patrimonio edilizio esistente, si è tradotta nell'esigenza di sviluppare una metodologia sistematica di raccolta di informazioni. L'obiettivo del lavoro di tesi di Simone De Cristofaro al Politecnico di Torino è stato proprio quello di reperire dati riguardanti le caratteristiche tipologico strutturali dei fabbricati di civile abitazione presenti in una specifica area comunale e conseguentemente sfruttarli per le stime di vulnerabilità (GDD) [2]. Più precisamente, il lavoro può essere riassunto in due fasi essenziali:

- Compilazione delle schede CARTIS di primo e secondo livello [3] ed acquisizione di informazioni qualitative riguardanti la caratterizzazione tipologico strutturale di edifici ordinari (nella maggior parte fabbricati con destinazione d'uso abitativa), prevalenti sul territorio del Comune di Spoltore (PE);
- Esecuzione di una misura completa della sicurezza strutturale su due edifici rappresentativi delle tipologie in c.a. del Comune di Spoltore (PE), da cui è possibile calcolare il GDD.

Sono infine valutate le principali differenze tra i GDD ottenuti per ogni singolo caso studio e l'evoluzione degli stessi negli anni utilizzando come comparazione i dati relativi ad un edificio sito a Settimo T.se (TO).

Applicazione delle schede CARTIS al comune di Spoltore (PE)

Spoltore è un Comune di 19247 abitanti situato in Abruzzo a pochi chilometri dalla Città di Pescara. È stato classificato sismicamente per la prima volta nel 2003, rientrando nella terza categoria.

Il primo step dello studio consiste nella compilazione delle schede CARTIS di primo e secondo livello. Tali schede sono finalizzate al rilevamento delle tipologie edilizie ordinarie maggiormente presenti all'interno di una determinata superficie territoriale (detta comparto), accomunate da tecniche costruttive e strutturali simili. Sono stati così individuati 3 comparti fondamentali: centro storico (C01), area di prima espansione (C02) e area di seconda espansione (C03). All'interno dei primi due sono stati riscontrati esclusivamente edifici realizzati in muratura portante, mentre nell'ultimo vi è maggiore presenza di fabbricati in cemento armato. All'interno di ogni comparto sono state poi individuate le tipologie edilizie prevalenti che sono risultate in totale 6, di cui 4 in muratura portante (C01_MUR1, C02_MUR1, C02_MUR2 e C03_MUR1) e le restanti 2 in c.a. (C03_CAR1 e C03_CAR2) (Figura 1). La compilazione delle schede CARTIS di primo livello ha quindi fornito un quadro completo delle caratteristiche del patrimonio edilizio esistente, evidenziando che l'avvento del c.a. nel territorio è risultato tardivo.

In seguito sono stati scelti degli edifici campione su cui basare la compilazione delle schede CARTIS di secondo livello, le quali vanno ad approfondire gli aspetti riguardanti un singolo fabbricato.

Da qui si è partiti con la seconda fase del lavoro che ha riguardato in primis la scelta di due casi studio rappresentativi delle tipologie in c.a., su cui eseguire una misura completa della sicurezza strutturale.

a. Codice	b. Denominazione Comparto	c. Epoca di Primo Impianto	d. Residenti [N°]	e. Edificio e Superficie Coperta [mq]	f. Abitazioni [N°]	g. Tipologie presenti nel comparto								h. Affidabilità Informazione				
						MURATURA (Codice)				CEMENTO ARMATO (Codice)								
						MUR 1	MUR 2	MUR 3	MUR 4	CAR 1	CAR 2	CAR 3	CAR 4	Bassa	Media	Alta		
C 01	CENTRO STORICO	115190	119119	12911	116386	14119	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C 02	AREA DI PRIMA ESPANSIONE	118615	119148	12977	149386	1779	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C 03	AREA DI SECONDA ESPANSIONE	119792	130888	1220	157309	1144	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 1 - Estratto della sezione 0 della scheda CARTIS di primo livello del Comune di Spoltore (PE)

Lo studio dei due edifici tipo in c.a.

Si è deciso di prendere in considerazione due edifici campione relativi al comparto 3 e all'interno delle tipologie CAR1 e CAR2. Le motivazioni di questa scelta sono state sostanzialmente due: la prima è legata al fatto che le categorie sopracitate sono le uniche che comprendono al loro interno strutture in c.a., la seconda invece riguarda la percentuale di presenza delle due tipologie all'interno dell'intero territorio, che risulta essere abbastanza elevata (65% del comparto 3 e circa il 20% dell'intera area).

I due edifici presi in considerazione per la valutazione di vulnerabilità sono:

- C03_CAR1_0001:** il fabbricato è stato realizzato nel 1982 ed è formato dall'insieme di 5 unità abitative disposte in serie aventi 3 piani fuori terra ed 1 seminterrato. Da un punto di vista strutturale esso è caratterizzato da telai bidirezionali con prevalenza di travi in spessore di solaio (sono presenti diverse sezioni tra cui 60x20 cm e 40x20 cm); nella direzione ortogonale a quella principale sono presenti alcune travi di modeste dimensioni, che però hanno una funzione prettamente di raccordo. I solai, invece, sono realizzati in latero cemento formati da travetti prefabbricati (H=16+4 cm) e orditi secondo un'unica direzione.
- C03_CAR2_0001:** Il secondo edificio, realizzato nel 2004, presenta 5 piani fuori terra di cui 1 interrato in cui sono localizzate le autorimesse. La struttura portante è realizzata in c.a. ed è formata da pilastri di grande dimensione (la sezione maggiore è da 30x110) e da un nucleo ascensore in calcestruzzo armato. Le travi sono tutte in spessore di solaio ed anche in questo caso si riscontrano luci molto grandi (l'interasse maggiore tra 2 pilastri è di 7 m). Come per il primo caso studio, anche in questo edificio i solai sono tutti realizzati in latero cemento con travetti prefabbricati (H= 25+5 cm), con l'unica differenza che nei vari piani gli impalcati sono orditi in direzioni diverse.

Su entrambi i progetti sono state svolte analisi strutturali complete, rispettando le direttive della normativa vigente (NTC 2018) [1]. In particolare, le operazioni eseguite si possono sintetizzare nelle seguenti fasi:

- Identificazione dei dati necessari alla restituzione del modello geometrico analitico rimanendo fedeli alle stratigrafie esistenti, alle dimensioni degli elementi strutturali ed alle proprietà dei materiali storici.
- Svolgimento del calcolo strutturale con l'analisi dinamica di riferimento (NTC 2018).

3. Calcolo del Grado di Difformità degli edifici.

A tal fine è stato utilizzato il software di calcolo strutturale DOLMEN [4], sviluppato e distribuito da CDM DOLMEN Srl di Torino.

Proprietà meccaniche dei materiali storici

La normativa vigente al capitolo 8 stabilisce che per condurre delle analisi strutturali su fabbricati esistenti, in termini di valutazione della sicurezza, è necessario effettuare un'operazione di ricerca preventiva volta alla determinazione della geometria, dei particolari costruttivi e delle proprietà meccaniche dei materiali presenti. Nel caso dei due fabbricati oggetto di analisi non si dispone di nessun tipo di prova o documentazione di collaudo che possa ricondurre alla determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali strutturali presenti.

Per l'acciaio la situazione risulta più agevole in quanto possono essere utilizzate le caratteristiche meccaniche delle armature utilizzate nelle varie epoche costruttive passate. In tal senso per il caso studio C03_CAR1_0001 è stato individuato l'acciaio FeB38k, mentre per il C03_CAR2_0001 l'acciaio è del tipo FeB44k. I parametri meccanici delle due tipologie di acciaio sono definiti nel D.M. 09/01/96 [5].

Il problema principale è legato alla conoscenza della resistenza a compressione del calcestruzzo esistente. Tuttavia, con riferimento ad alcune ricerche sviluppate nel Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino [6], tale resistenza si evince dalle curve di correlazione tra la resistenza caratteristica cubica del calcestruzzo e l'età di costruzione dei fabbricati (Figura 2). Il periodo di riferimento di tali curve va dal 1915 fino al 2005 e ad ognuna di esse è associato un diverso frattile (dal 5% al 95%). In assenza di prove in sito si è deciso di utilizzare i valori medi (50%) riferiti ai due periodi di costruzione degli edifici oggetto di studio (Tabella 1).

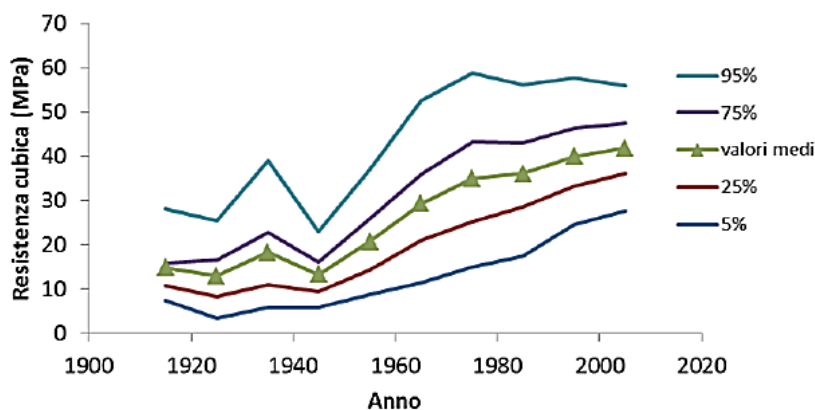


Figura 2 - Frattili della resistenza a compressione del calcestruzzo funzione dell'età di costruzione

Tabella 1 - Tab. 3.1 Valori Rck dei due casi studio

Rck [Mpa]		
Edificio	Anno di costruzione	Frattile 50% (valore medio)
C03_CAR1_0001	1982	35.887
C03_CAR2_0001	2004	41.631

L'analisi strutturale degli edifici tipo in c.a.

Per eseguire una misura completa della sicurezza strutturale è stato necessario effettuare una modellazione di entrambi i casi studio, con lo scopo di progettare e verificare tutti gli elementi strutturali, rispettando quanto richiesto dalle NTC 2018. Tali operazioni sono state svolte con il programma di calcolo DOLMEN, prodotto e distribuito da CDM DOLMEN Srl di Torino, attraverso alcune fasi descritte di seguito.

- Modellazione geometrica delle strutture: in questo primo step sono stati riprodotti i modelli tridimensionali delle due strutture, mantenendo inalterate le sezioni dei vari elementi presenti; oltre alle travi ed ai pilastri, sono stati modellati anche i muri di contenimento, le scale a soletta rampante, i solai, i balconi e le strutture di fondazione (Figura 3).

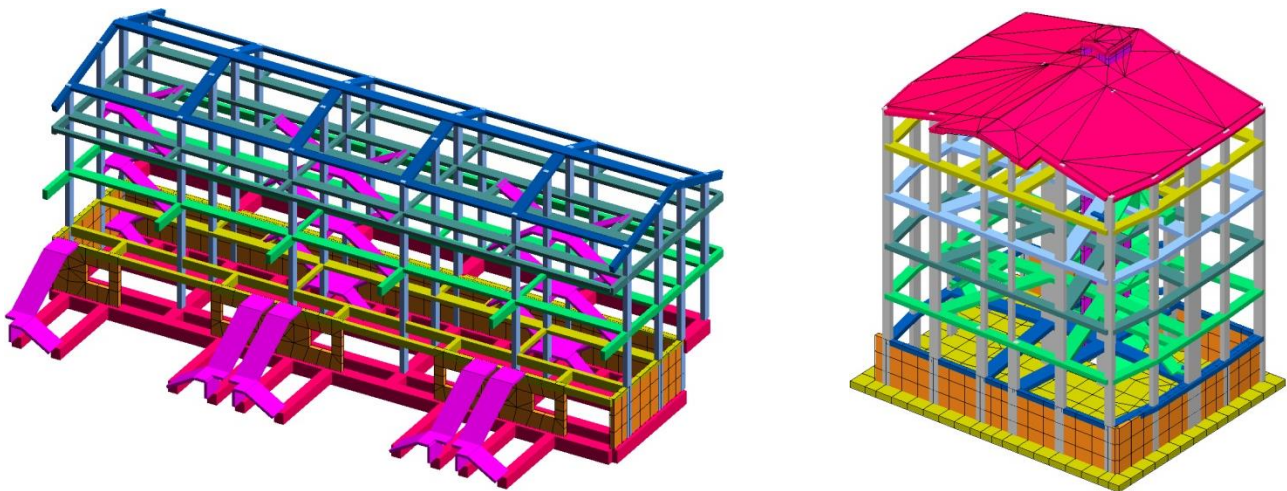


Figura 3 - Modello strutturale dei casi studio C03_CAR1_0001 e C03_CAR2_0001

- Definizione ed implementazione dei carichi agenti: per quanto riguarda i carichi variabili, per l'incidenza dei tramezzi ed il calcolo dell'azione della neve sono state seguite le direttive della normativa vigente [1] (l'azione del vento non è stata considerata in quanto è risultata essere irrilevante rispetto a quella sismica).
- Azione sismica: la determinazione degli effetti dell'azione sismica è stata condotta utilizzando l'analisi modale con spettro di risposta, per entrambi i progetti è stato impiegato un fattore di struttura (q) pari a 1.5 con l'ipotesi di struttura non dissipativa (NTC 2018, tab. 7.3.I, par. 7.3).
- Calcolo delle sollecitazioni: il software di calcolo DOLMEN crea in automatico le combinazioni di carico definite dalla normativa vigente.
- Progetto e verifica di travi e pilastri: con il programma DOLMEN sono state progettate e verificate tutte le travi ed i pilastri appartenenti ai due casi studio.

Risultati

Dopo aver eseguito la progettazione e la verifica di tutti gli elementi strutturali è stato possibile effettuare un'operazione di confronto tra le carpenterie realizzate seguendo le prescrizioni della normativa vigente e quelle dei progetti originari, in modo da poterne valutare le difformità.

Per necessità di sintesi di seguito sono stati messi a confronto solamente due elementi strutturali appartenenti al primo caso studio (vedi Figura 4). Dalle immagini è possibile notare come la disposizione e i diametri delle barre di armatura longitudinali siano in netto contrasto.

Nell'esistente, infatti, sono presenti tre tipologie di diametri che vanno dal più piccolo, di 12 mm, al più grande di 16 mm. I primi sono stati utilizzati maggiormente nei correnti superiori, mentre i secondi nei correnti inferiori e in corrispondenza degli appoggi, dove le sollecitazioni risultano maggiori. Inoltre viene riscontrata la presenza di elementi "a cavalletto", realizzati in modo da seguire il diagramma di momento. Viceversa, una progettazione più attuale è realizzata con barre di diametri maggiori (ad esempio 16 - 18 mm). La scelta di utilizzare dei diametri più grandi è dovuta al fatto che i momenti sollecitanti risultano essere maggiori rispetto alla situazione di partenza a causa dell'azione sismica, che nel progetto originario non era stata presa in considerazione.

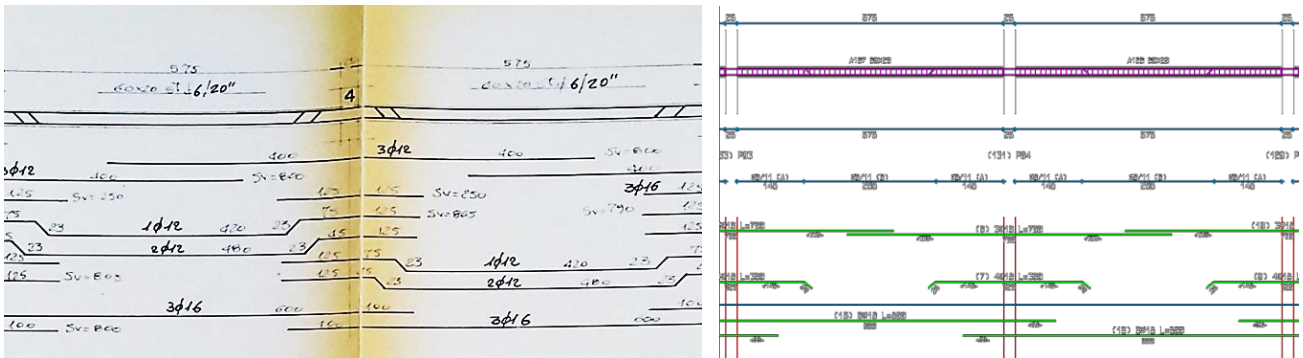


Figura 4 - Armature del progetto originario e armature progettate secondo le NTC 2018 [1]

Anche per quanto riguarda i pilastri le differenze sono notevoli: nel caso dell'esistente sono presenti 6 correnti di diametro 16 mm che si estendono per tutta l'altezza della pilastrata, mentre nell'armatura progettata secondo le NTC 2018 i 6 correnti hanno diametro di 18 mm.

Calcolo del grado di difformità

A questo punto risulta di fondamentale importanza quantificare la vulnerabilità sia delle singole membrature, sia della struttura nella sua interezza attraverso il calcolo del grado di difformità (gdd) [2]. Tale parametro esprime la differenza tra la quantità di armatura longitudinale progettata secondo la normativa vigente e quella realmente presente, ed è espresso come:

$$gdd = \frac{c_1 - c_2}{c_2} \cdot 100$$

Dove:

- c_1 è la quantità di armatura longitudinale, espressa in kg, prevista dalle NTC 2018
- c_2 è la quantità di armatura longitudinale, espressa in kg, esistente

In tabella 2 sono riportati, a titolo di esempio, i dati riassuntivi riferiti al calcolo del grado di difformità per due travi e due pilastri appartenenti ad ogni singolo caso studio.

Tabella 2 - Esempi di calcolo del grado di difformità

PILASTRO P01 C03_CAR1_0001	Peso totale armatura [kg]	gddi [%]	PILASTRO P05 C03_CAR2_0001	Peso totale armatura [kg]	gddi [%]
NTC 2018	304	314.21	NTC 2018	309	73.45
Esistente	73.39		Esistente	178.14	

TRAVE T220 C03_CAR1_0001	Peso totale armatura [kg]	gddi [%]
NTC 2018	851	88.26
Esistente	452	

TRAVE T3020 C03_CAR2_0001	Peso totale armatura [kg]	gddi [%]
NTC 2018	413	38.64
Esistente	297.88	

Per ottenere un parametro che quantifichi il livello di vulnerabilità dell'intero fabbricato è necessario calcolare i gdd di tutti gli elementi strutturali del telaio. Entra in gioco così il GDD, che rappresenta il grado di difformità dell'intera struttura, calcolato facendo la media di tutti i gdd, ponderata rispetto al quantitativo di armatura longitudinale prevista dalle NTC 2018. Pertanto il grado di difformità dell'intera struttura portante risulta:

$$GDD = \frac{\sum_{i=1}^n gdd_i \cdot c_{1i}}{\sum_{i=1}^n c_{1i}}$$

In tabella 3 vengono esposti di seguito i risultati finali dei GDD calcolati per entrambi i casi studio.

Tabella 3 - I GDD delle 2 strutture analizzate

C03_CAR1_0001
GDD [%]
239.53

C03_CAR2_0001
GDD [%]
72.85

L'evoluzione del grado di difformità negli anni

In questo lavoro ci si è concentrati nell'analizzare la variazione dei GDD negli anni e le sostanziali differenze riscontrate sulla comparazione dei casi studio. Una prima considerazione può essere fatta in merito alle differenze tra i *gdd* ricavati per le travate e le pilastrate di riferimento delle 2 strutture analizzate: in entrambi i casi si nota come i *gdd* dei pilastri siano maggiori rispetto a quelli delle travi, sostanzialmente perché l'azione sismica genera sollecitazioni maggiori nei suddetti elementi strutturali. Inoltre i valori più alti per entrambi gli elementi strutturali vengono riscontrati nel progetto C03_CAR1_0001, attestando una notevole difformità in termini di quantità di armatura longitudinale.

Osservando, invece, il valore GDD per il primo caso studio si deduce che il livello di vulnerabilità dell'intero edificio, espresso in termini di quantità di armatura mancante al raggiungimento dello standard di normativa, risulta essere molto elevato (239,53%); nell'altro invece il livello si attesta su un ordine di grandezza inferiore (72,85%), evidenziando una netta difformità tra i due progetti. I fattori che influenzano tali risultati sono molteplici e fanno riferimento non solo alla differente epoca costruttiva/normativa di riferimento, ma anche al tipo di geometria, alle sezioni degli elementi, alle masse ed alle rigidità, che portano ad avere una differenziazione del comportamento strutturale sotto l'azione sismica (sollecitazioni localizzate e variabili).

Un ulteriore confronto è stato fatto con un caso studio localizzato nel Comune di Settimo Torinese (tesi "La valutazione della vulnerabilità sismica dei centri urbani. Il caso studio degli edifici nel Comune di Settimo Torinese." M. Belluccio, dicembre 2017), in cui è stata svolta la medesima procedura [7]. L'edificio realizzato negli anni 60' (zona sismica 4) ha evidenziato un valore del GDD pari a 347,19 % (Figura 5).

Comparando i 3 risultati (Figura 5) è possibile osservare come nel susseguirsi degli anni e delle diverse normative, la percentuale di armatura negli elementi strutturali sia man mano aumentata.

I GDD calcolati per i casi studio del Comune di Spoltore e di Settimo Torinese possono essere utilizzati per una valutazione semplificata della vulnerabilità degli edifici di c.a. presenti sul territorio nazionale.

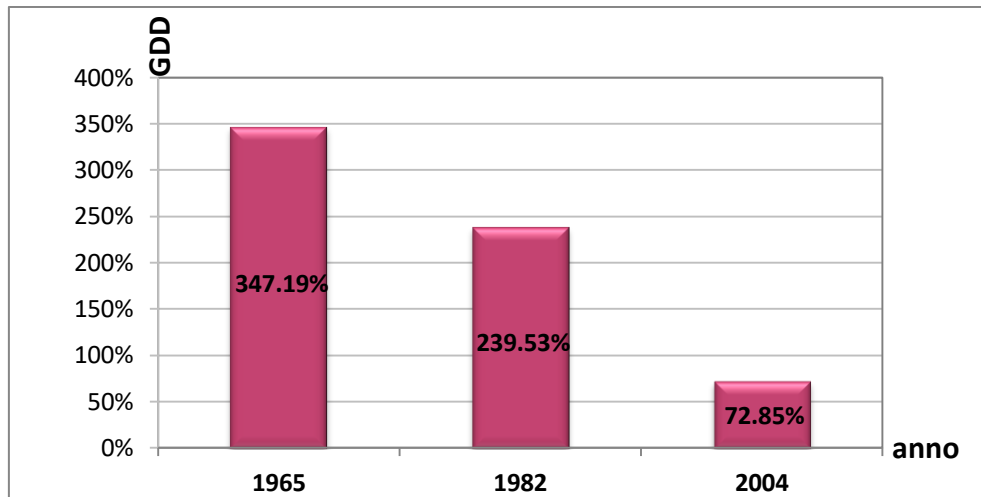


Figura 5 - Evoluzione del GDD negli anni

Bibliografia

- [1] DM 14 GENNAIO 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni
- [2] Valutazione semplificata della vulnerabilità sismica: gli edifici in CA del Comune di Ivrea; Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia, Sean Ollearo, Giuseppe Stivala; Ingenio; 2017.
- [3] Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari (CARTIS 2014); ReLUIS, Dipartimento della Protezione Civile.
- [4] CDM DOLMEN Srl. Dimensionamento c.a., Manuale DOLMEN 19, Capitolo 3, 2018
- [5] DM 9 GENNAIO 1996, Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- [6] La resistenza dei calcestruzzi confezionati nella prima metà del '900; Ferraro Erik, Alessandro P. Fantilli; Ingenio; 2019.
- [7] La valutazione della vulnerabilità sismica dei centri urbani: il caso studio degli edifici nel comune di Settimo torinese; Marco Belluccio, Alessandro P. Fantilli; Bernardino Chiaia, CDM DOLMEN; Calcolo strutturale.com; 2019.