***Le costruzioni devono avere, quanto più possibile, struttura iperstatica caratterizzata da******regolarità in pianta****e****regolarità in altezza****.* Inizia così il paragrafo delle NTC2018 dedicato alla descrizione delle ***Caratteristiche Generali delle Costruzioni* (par. 7.2.1).**

**-------------------------------------------------------------------------------------------------------**

**NTC2018**

**7.0. GENERALITÀ Il presente capitolo disciplina la progettazione e la costruzione delle nuove opere soggette anche all’azione sismica. Le sue indicazioni sono da considerarsi aggiuntive e non sostitutive di quelle riportate nei Capitoli 4, 5 e 6; si deve inoltre far sempre riferimento a quanto indicato nel Capitolo 2, per la valutazione della sicurezza, e nel Capitolo 3, per la valutazione dell’azione sismica. Le costruzioni caratterizzate, nei confronti dello SLV, da agS ǂ 0,075g, in cui S è il coefficiente che comprende l’effetto dell’amplificazione stratigrafica (SS) e dell’amplificazione topografica (ST), di cui al § 3.2.3.2, e ag è l’accelerazione orizzontale massima per il suddetto SLV su sito di riferimento rigido, possono essere progettate e verificate come segue: - si considera la combinazione di azioni definita nel § 2.5.3, applicando, in due direzioni ortogonali, il sistema di forze orizzontali definito dall’espressione [7.3.7] assumendo Fh = 0,10 W O per tutte le tipologie strutturali, essendo O definito al §7.3.3.2; - si richiede la sola verifica nei confronti dello SLV; - si utilizza in generale una “progettazione per comportamento strutturale non dissipativo”, quale definita nel § 7.2.2; qualora si scelga una “progettazione per comportamento strutturale dissipativo”, quale definita nel § 7.2.2, si possono impiegare, in classe di duttilità CD“B”, valori unitari per i coefficienti JRd di cui alla Tab. 7.2.I; - ad eccezione del caso di edifici fino a due piani, considerati al di sopra della fondazione o della struttura scatolare rigida di cui al § 7.2.1, gli orizzontamenti devono rispettare i requisiti di rigidezza e resistenza di cui al § 7.2.2.**

**7.1. REQUISITI NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE S’intende per: - capacità di un elemento strutturale o di una struttura: l’insieme delle caratteristiche di rigidezza, resistenza e duttilità da essi manifestate, quando soggetti ad un prefissato insieme di azioni; - domanda su un elemento strutturale o su una struttura: l’insieme delle caratteristiche di rigidezza, resistenza e duttilità ad essi richieste da un prefissato insieme di azioni. Sotto l’effetto delle azioni definite nel § 3.2, deve essere garantito il rispetto degli stati limite ultimi e di esercizio, quali definiti al § 3.2.1 e individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso che include, oltre agli elementi strutturali in elevazione e di fondazione, agli elementi non strutturali e agli impianti, il volume significativo di terreno definito al § 6.2.2. La verifica nei confronti dei vari stati limite si effettua confrontando capacità e domanda; in mancanza di specifiche indicazioni in merito, la verifica si considera svolta positivamente quando sono soddisfatti i requisiti di rigidezza, resistenza e duttilità, per gli elementi strutturali, e di stabilità e funzionalità, per gli elementi non strutturali e gli impianti, secondo quanto indicato al § 7.3.6. Per tutti gli stati limite, le strutture di fondazione devono resistere agli effetti risultanti dalla risposta del terreno e delle strutture sovrastanti, senza spostamenti permanenti incompatibili con lo stato limite di riferimento. Al riguardo, deve essere valutata la risposta sismica e la stabilità del sito, secondo quanto indicato nel § 7.11.5.**

**7.2. CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E MODELLAZIONE**

**7.2.1. CARATTERISTICHE GENERALI DELLE COSTRUZIONI REGOLARITÀ**

**Le costruzioni devono avere, quanto più possibile, struttura iperstatica caratterizzata da regolarità in pianta e in altezza. Se necessario, ciò può essere conseguito suddividendo la struttura, mediante giunti, in unità tra loro dinamicamente indipendenti. Per quanto riguarda gli edifici, una costruzione è regolare in pianta se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:**

**a) la distribuzione di masse e rigidezze è approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali e la forma in pianta è compatta, ossia il contorno di ogni orizzontamento è convesso; il requisito può ritenersi soddisfatto, anche in presenza di rientranze in pianta, quando esse non influenzano significativamente la rigidezza nel piano dell’orizzontamento e, per ogni rientranza, l’area compresa tra il perimetro dell’orizzontamento e la linea convessa circoscritta all’orizzontamento non supera il 5% dell’area dell’orizzontamento;**

**b) il rapporto tra i lati del rettangolo circoscritto alla pianta di ogni orizzontamento è inferiore a 4;**

**c) ciascun orizzontamento ha una rigidezza nel proprio piano tanto maggiore della corrispondente rigidezza degli elementi strutturali verticali da potersi assumere che la sua deformazione in pianta influenzi in modo trascurabile la distribuzione delle azioni sismiche tra questi ultimi e ha resistenza sufficiente a garantire l’efficacia di tale distribuzione. Sempre riferendosi agli edifici, una costruzione è regolare in altezza se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:**

**d) tutti i sistemi resistenti alle azioni orizzontali si estendono per tutta l’altezza della costruzione o, se sono presenti parti aventi differenti altezze, fino alla sommità della rispettiva parte dell’edificio; — 209 — 20-2-2018 Supplemento ordinario n. 8 alla GAZZETTA UFFICIALE Serie generale - n. 42;**

**e) massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all’altro non superano il 25%, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o di pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull’altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell’azione sismica alla base;**

**f) il rapporto tra la capacità e la domanda allo SLV non è significativamente diverso, in termini di resistenza, per orizzontamenti successivi (tale rapporto, calcolato per un generico orizzontamento, non deve differire più del 30% dall’analogo rapporto calcolato per l’orizzontamento adiacente); può fare eccezione l’ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;**

**g) eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengano con continuità da un orizzontamento al successivo; oppure avvengano in modo che il rientro di un orizzontamento non superi il 10% della dimensione corrispondente all’orizzontamento immediatamente sottostante, né il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento. Fa eccezione l’ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro orizzontamenti, per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.**

**Qualora, immediatamente al di sopra della fondazione, sia presente una struttura scatolare rigida, purché progettata con comportamento non dissipativo, i controlli sulla regolarità in altezza possono essere riferiti alla sola struttura soprastante la scatolare, a condizione che quest’ultima abbia rigidezza rispetto alle azioni orizzontali significativamente maggiore di quella della struttura ad essa soprastante. Tale condizione si può ritenere soddisfatta se gli spostamenti della struttura soprastante la scatolare, valutati su un modello con incastri al piede, e gli spostamenti della struttura soprastante, valutati tenendo conto anche della deformabilità della struttura scatolare, sono sostanzialmente coincidenti. Per i ponti le condizioni di regolarità sono definite nel § 7.9.2.1.**

**-------------------------------------------------------------------------------------------------------**

**Spetta al progettista verificare la regolarità in pianta e in altezza di una struttura. La presenza o meno di questi requisiti avrà un impatto sul valore dell’azione sismica agente. La regolarità in altezza è un requisito più complesso da verificare rispetto alla regolarità in pianta. Per poterla accertare dovrai applicare un procedimento iterativo. Ma andiamo con ordine. Iniziamo dai quattro requisiti richiesti dalle NTC2018 per la regolarità in altezza di una struttura.**



I requisiti per la regolarità in altezza di una struttura

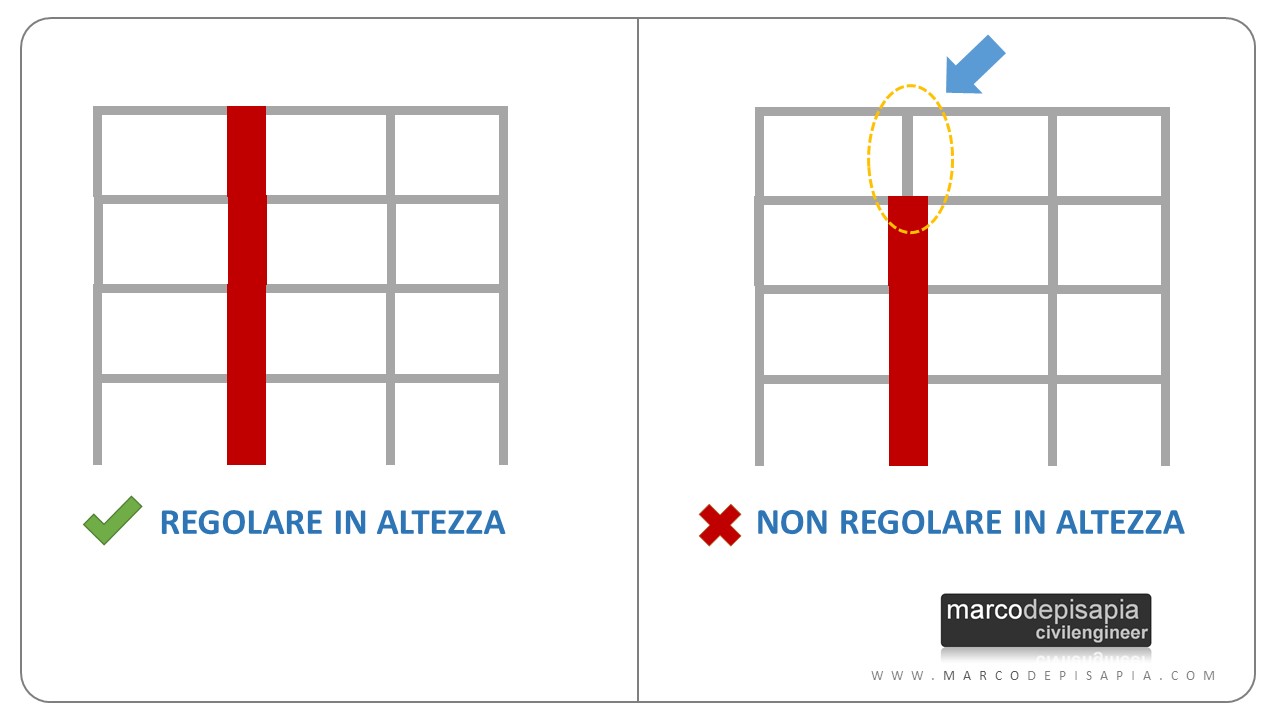
Ti riporto di seguito i **quattro** requisiti richiesti dalla **Normativa Tecnica** necessari per definire una struttura regolare in altezza. Affinché un edificio possa essere definito regolare in altezza i requisiti elencati di seguito dovranno essere **tutti** presenti.

 1) L’altezza dei sistemi sismo-resistenti

Il primo requisito riguarda l’estensione in **altezza** dei sistemi di **controvento** della struttura, ovvero dei telai e delle pareti progettati per resistere alle azioni orizzontali. La prescrizione della Normativa Tecnica:

***d)****tutti i sistemi resistenti alle azioni orizzontali si estendono per****tutta l’altezza****della costruzione o, se sono presenti parti aventi differenti altezze, fino alla sommità della rispettiva parte dell’edificio;*

par. 7.2.1 – NTC2018



 2) Le variazioni di massa e rigidezza

Il secondo requisito riguarda la variazione di **massa** e **rigidezza** fra due impalcati consecutivi dell’edificio.

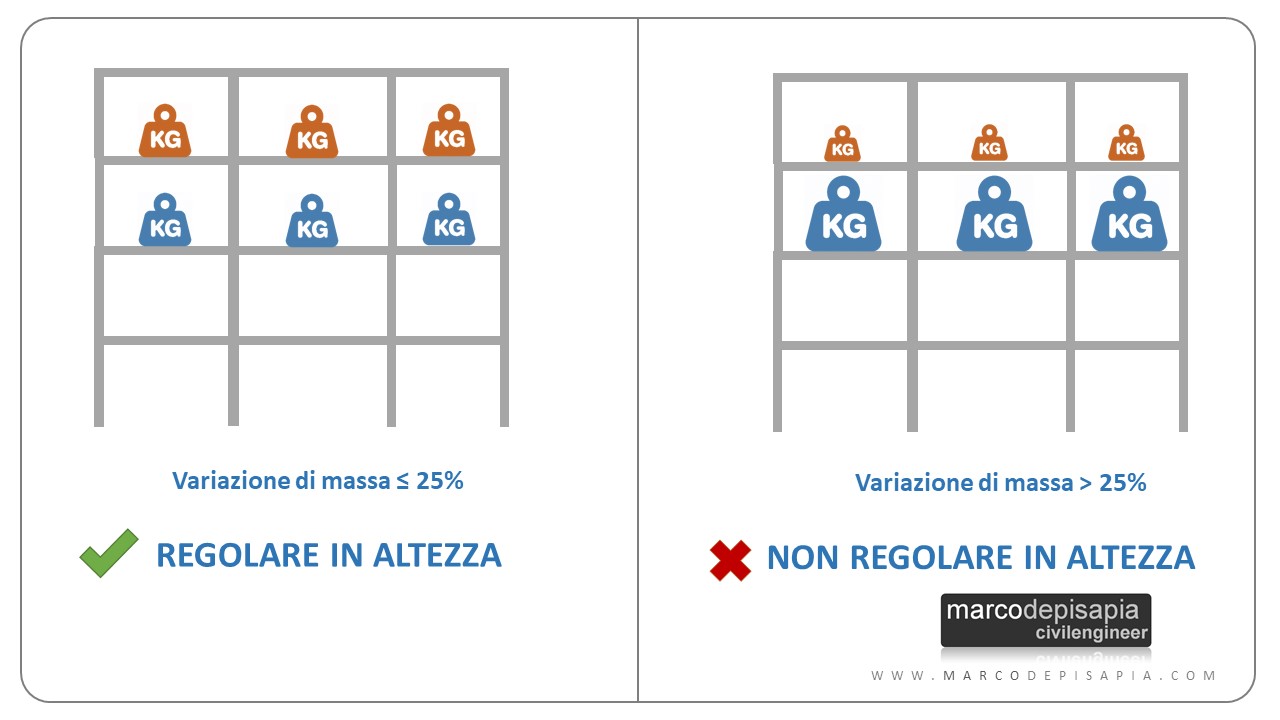
***e)******massa****e****rigidezza****rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le****variazioni di massa****da un orizzontamento all’altro non superano il****25%****, la****rigidezza****non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del****30%****e non aumenta più del****10%****);*

*ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di****pareti****o****nuclei****in****c.a.****o di****pareti e nuclei in muratura****di sezione costante sull’altezza o di****telai****controventati in****acciaio****, ai quali sia affidato almeno il****50%****dell’azione sismica alla base;*

par. 7.2.1 – NTC2018

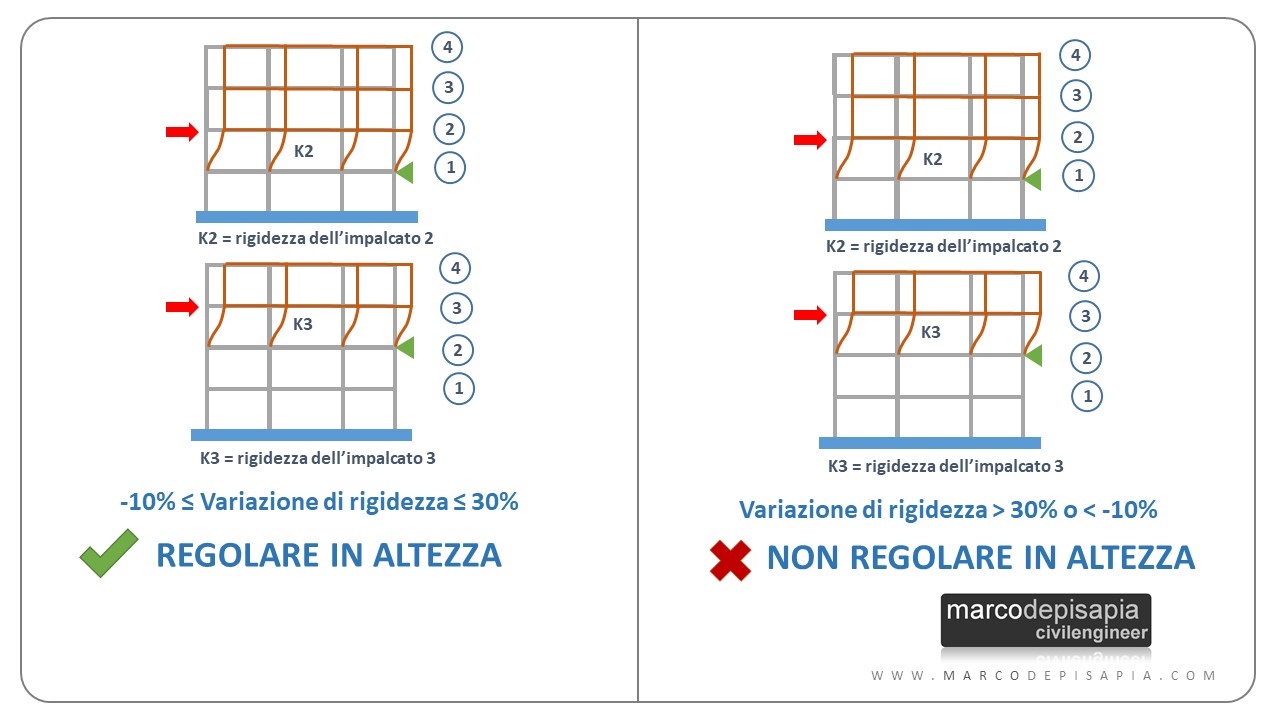
Come controllare la variazione di massa

La **variazione di massa** fra due impalcati consecutivi è semplice da controllare. Considerando che solitamente gli impalcati hanno una **distribuzione uniforme** di massa e dei carichi permanenti e accidentali agenti, a meno di carichi concentrati o agenti localmente su una porzione limitata dell’impalcato, il controllo della variazione di massa si riduce ad un controllo della **variazione di superficie** di due impalcati consecutivi. Tale variazione di superficie deve essere minore del **25%**.

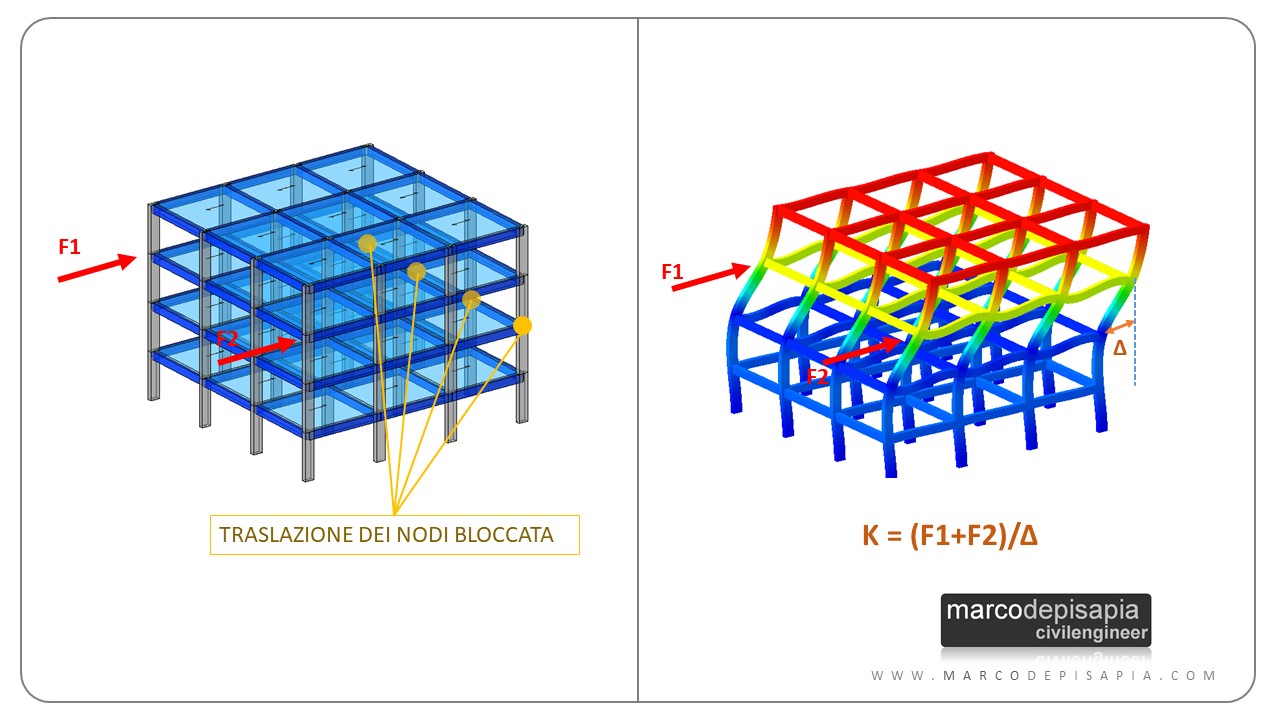


Come controllare la variazione di rigidezza (senza eseguire calcoli manuali)

Meno immediato è il controllo sulla**variazione di rigidezza** fra un impalcato e quello immediatamente sovrastante. La Normativa prescrive che, per ogni impalcato, la rigidezza traslante dell’impalcato sovrastante non può ridursi oltre il 30% e non può aumentare più del 10%.



Ma come facciamo a controllare che la variazione di rigidezza rispetti questi limiti? C’è un modo**semplice e rapido** che ti permetterà di eseguire questo controllo evitando di eseguire calcoli manuali ed utilizzando il **modello di calcolo** creato nel tuo software. Per valutare la rigidezza traslante in corrispondenza di un impalcato è sufficiente bloccare lo spostamento rigido dell’impalcato immediatamente sottostante, vincolando i nodi in modo da impedire le traslazioni lungo X e Y. L’impalcato va poi **caricato** con **due forze orizzontali** concentrate, della stessa intensità arbitraria. Eseguendo l’analisi statica della struttura otterremo lo **spostamento** dell’impalcato per effetto delle due forze agenti. La rigidezza dell’impalcato sarà data dal rapporto fra la **somma** delle due forze e lo **spostamento** medio di impalcato.



Eseguendo quest’operazione per tutti gli impalcati, possiamo valutare la **variazione di rigidezza** fra un impalcato e l’altro e controllare se il requisito prescritto dalla Normativa è rispettato.

 3) Rapporto *capacità/domanda* in termini di resistenza

Il terzo requisito riguarda la variazione di resistenza. Ecco cosa prescrive la Normativa Tecnica:

***f)****il rapporto tra la****capacità****e la****domanda****allo****SLV****non è significativamente diverso, in termini di resistenza, per orizzontamenti successivi (tale rapporto, calcolato per un generico orizzontamento, non deve differire più del****30%****dall’analogo rapporto calcolato per l’orizzontamento adiacente); può fare eccezione l****’ultimo orizzontamento****di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;*

par. 7.2.1 – NTC2018

Il rapporto fra capacità e domanda di un orizzontamento può essere valutato come il **valore medio** di tutti i coefficienti di sicurezza degli elementi resistenti verticali, ovvero la media dei rapporti fra la **sollecitazione** allo SLV e la **resistenza** dell’elemento.

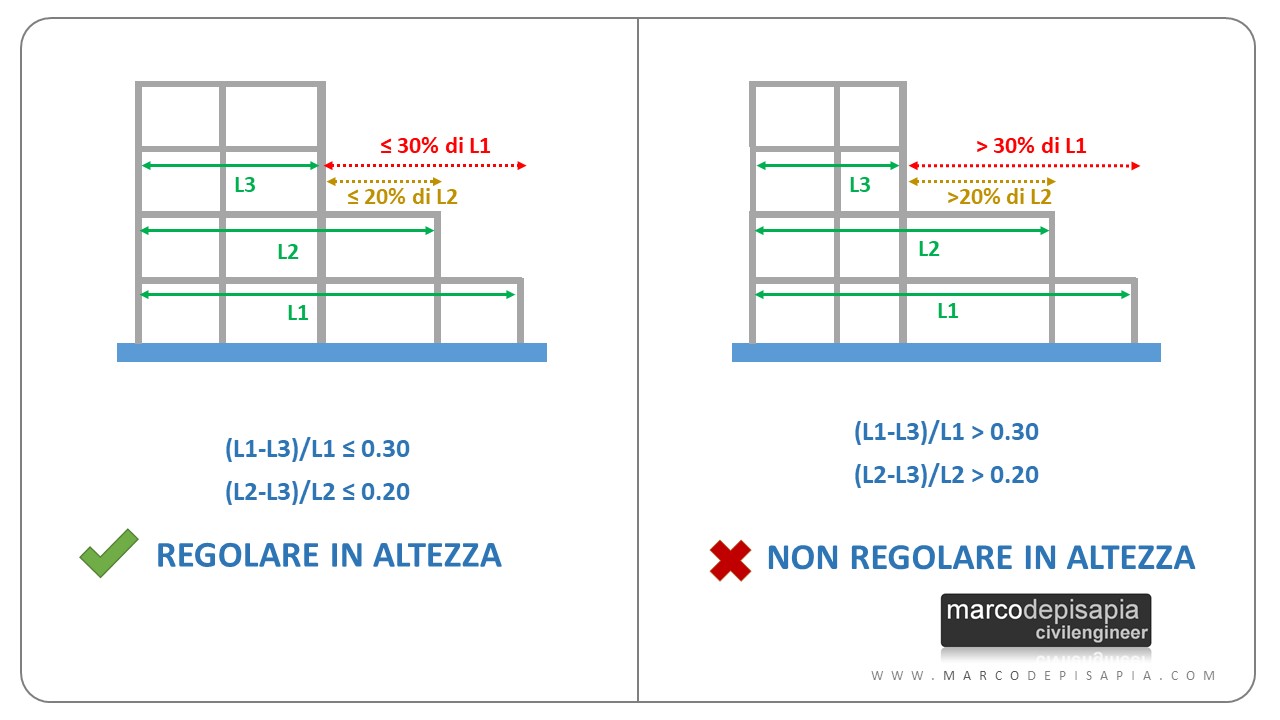
 4) Restringimenti della sezione orizzontale

Di seguito ti riporto il quarto ed ultimo requisito richiesto dalla Normativa per la valutazione della regolarità in altezza di una struttura.

***g)****eventuali****restringimenti****della sezione orizzontale della costruzione avvengano con continuità da un orizzontamento al successivo; oppure avvengano in modo che il****rientro****di un orizzontamento non superi il****10%****della dimensione corrispondente all’orizzontamento immediatamente sottostante, né il****30%****della dimensione corrispondente al primo orizzontamento. Fa eccezione l’ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro orizzontamenti, per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.*

par. 7.2.1 – NTC2018

Come hai potuto vedere l’ultimo requisito riguarda solo il restringimento degli impalcati passando da un piano a quello successivo e il restringimento di ciascun impalcato rispetto al primo. Di seguito un’immagine esplicativa.



L’influenza della regolarità in altezza sul *fattore di comportamento*

Ti ricordo che nella quasi totalità dei casi i software di calcolo non valutano in automatico la regolarità in altezza di una struttura. Spetta pertanto al **progettista** il compito di accertare la presenza o meno di questo requisito. Ma come influisce la regolarità in altezza sull’azione sismica agente?

Come per la [regolarità in pianta](https://www.marcodepisapia.com/regolarita-in-pianta/), anche la presenza o meno della **regolarità in altezza**influisce sulla valutazione del [fattore di comportamento](https://www.marcodepisapia.com/il-fattore-di-struttura-un-piccolo-numero-dal-grande-significato/) attraverso il coefficiente **KR** come riportato di seguito:

qlim = q0 \* KR

* ***KR = 1 per costruzioni regolari in altezza;***
* ***KR = 0.80 per costruzioni non regolari in altezza;***
* ***qlim = limite superiore del fattore di comportamento allo SLV;***
* ***q0 = valore base del fattore di comportamento riportato in tabella 7.3.II delle NTC2018 in funzione della classe di Duttilità, della tipologia strutturale e del rapporto αu/α1.***

par. 7.2.1 delle NTC2018

Per strutture **non regolari** in altezza il fattore di comportamento sarà**ridotto del 20%** rispetto alle strutture regolari in altezza. Di conseguenza l’azione sismica agente sarà più alta, in quanto lo [spettro di progetto](https://www.marcodepisapia.com/spettri-elastici-il-laborioso-processo-che-li-ha-generati-video/) sarà ridotto utilizzando un valore minore del fattore di comportamento.

Il paradosso della regolarità in altezza: un requisito difficile da valutare

Per stabilire se una struttura è regolare in altezza o meno, dovremo accertare che **tutti e quattro** i requisiti richiesti siano soddisfatti. C’è però una complicazione. In fase di progettazione potremo controllare la presenza solo di **tre** requisiti su quattro. Nello specifico:

* L’**altezza** dei sistemi sismo-resistenti;
* **Variazioni** di massa e rigidezza;
* **Restringimenti** della sezione orizzontale degli impalcati.

Il quarto requisito relativo al rapporto **capacità/domanda** per ciascun impalcato potrà essere verificato solo **dopo** aver eseguito il calcolo della struttura, valutando le **sollecitazioni** per ogni elemento strutturale e disponendo le **armature** nel caso di elementi resistenti in calcestruzzo armato. Le sollecitazioni sismiche dipendono dal fattore di comportamento il cui valore a sua volta dipende dalla regolarità o meno in altezza attraverso il **fattore KR** visto in precedenza. In fase di predimensionamento non siamo in grado quindi di definire se la struttura è regolare in altezza oppure no. Quindi come fare?

Due opzioni disponibili: procedimento iterativo o irregolarità forzata

Immagina che **tre requisiti su quattro** siano rispettati. Manca da valutare il rispetto della variazione del rapporto di resistenza. Puoi ipotizzare che la struttura sia non-regolare in altezza ed eseguire il calcolo. Se alla fine del calcolo, il requisito risulterà soddisfatto, allora dovrai eseguire nuovamente il calcolo, stavolta però considerando la struttura regolare in altezza, perché cambierà il valore dell’azione sismica. Alla fine del calcolo accerterai di nuovo il requisito capacità/domanda. Si tratta pertanto di un procedimento iterativo.

Una seconda strada più **pratica** e **veloce** è quella di assumere la struttura **non regolare** in altezza, a prescindere dal rispetto o meno di tutti i requisiti. Definendo la struttura non regolare in altezza, **accettiamo**un valore del fattore di comportamento più basso del 20% rispetto al caso di struttura regolare in altezza e di conseguenza un’azione sismica più gravosa.

Conclusioni

La regolarità in altezza è un requisito più laborioso da verificare rispetto alla regolarità in pianta. Come per la regolarità in pianta, anche per la regolarità in altezza i software di calcolo non sono in grado di controllare in automatico il rispetto dei requisiti richiesti. Spetta al **progettista** eseguire questo **controllo**. La soluzione più pratica da adottare è quella di definire la struttura non regolare in altezza, a prescindere dal rispetto o meno di tutti i requisiti, tollerando un’azione sismica maggiore.

7.3.3.2 ANALISI LINEARE STATICA L’analisi lineare statica consiste nell’applicazione di forze statiche equivalenti alle forze d’inerzia indotte dall’azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino i requisiti specifici riportati nei paragrafi successivi, a condizione che il periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame (T1) non superi 2,5 TC o TD e che la costruzione sia regolare in altezza. Per costruzioni civili o industriali che non superino i 40 m di altezza e la cui massa sia distribuita in modo approssimativamente uniforme lungo l’altezza, T1 (in secondi) può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, utilizzando la formula seguente: T1 2 d [7.3.6] dove d è lo spostamento laterale elastico del punto più alto dell'edificio, espresso in metri, dovuto alla combinazione di carichi [2.5.7] applicata nella direzione orizzontale. L’entità delle forze si ottiene dall’ordinata dello spettro di progetto corrispondente al periodo T1 e la loro distribuzione sulla struttura segue la forma del modo di vibrare principale nella direzione in esame, valutata in modo approssimato. La forza da applicare a ciascuna massa della costruzione è data dalla formula seguente: ¦ j j j i i h i z W W F F z [7.3.7] dove: Fh = Sd (T1) W Ώ/g Fi è la forza da applicare alla massa i-esima; Wi e Wj sono i pesi, rispettivamente, della massa i e della massa j; zi e zj sono le quote, rispetto al piano di fondazione (v. § 3.2.3.1), delle masse i e j; Sd(T1) è l’ordinata dello spettro di risposta di progetto definito al § 3.2.3.5; W è il peso complessivo della costruzione; Ώ è un coefficiente pari a 0,85 se T1 < 2TC e la costruzione ha almeno tre orizzontamenti, uguale a 1,0 in tutti gli altri casi; g è l’accelerazione di gravità. 7.3.3.3 VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI DELLA STRUTTURA Gli spostamenti dE sotto l’azione sismica di progetto relativa allo SLV si ottengono moltiplicando per il fattore di duttilità in spostamento μd i valori dEe ottenuti dall’analisi lineare, dinamica o statica, secondo l’espressione seguente: d E ȝd d Ee r [7.3.8] Dove :   
 1 C 1 C d d 1 C se T T T T ȝ 1 q 1 ȝ q se T T ­ t [7.3.9] In ogni caso μd ǂ 5q – 4. — 220 — 20-2-2018 Supplemento ordinario n. 8 alla GAZZETTA UFFICIALE Serie generale - n. 42 Gli spostamenti allo SLC si possono ottenere, in assenza di più accurate valutazioni che considerino l’effettivo rapporto delle ordinate spettrali in spostamento, moltiplicando per 1,25 gli spostamenti allo SLV.