



# VIBRAZIONI

PRESENTA:

**GIOVANNI CANETTA - CEAS**

24 Ottobre 2022



- 1. VIBRAZIONI E RUMORE**
- 2. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI**
- 3. LIMITI DI NORMATIVA**
- 4. PROGETTAZIONE**
- 5. LE VIBRAZIONI NELLO STADIO**
- 6. CONCLUSIONI**

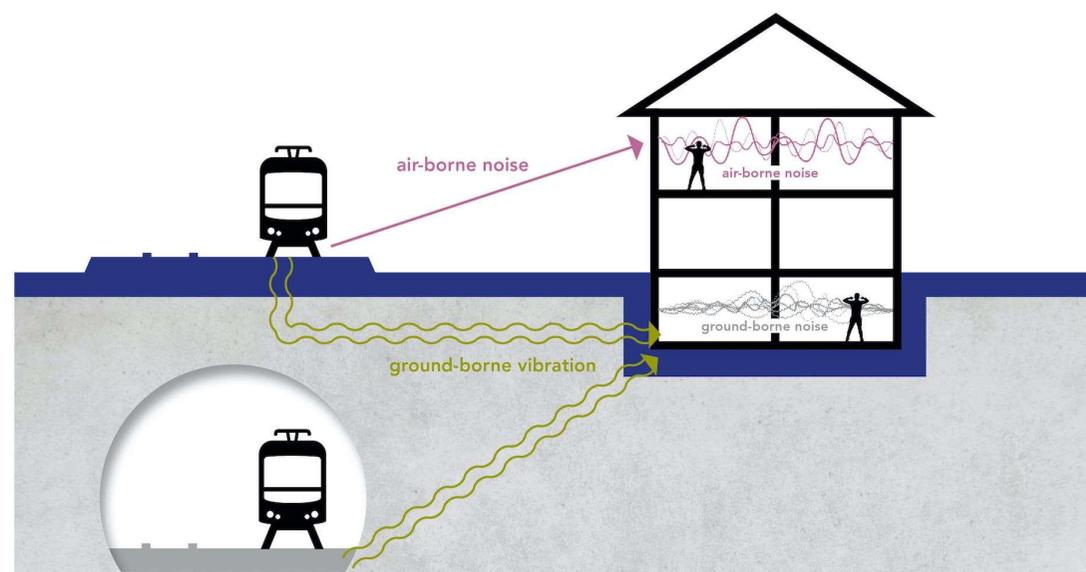
## VIBRAZIONE E RUMORE

**Rumore:** propagazione di onde (sonore) nell'aria, in un campo di frequenze udibile (20-20.000 Hz o cicli al secondo)

**Vibrazioni:** propagazione di onde nella materia solida (terreno, edifici), principalmente in un campo di frequenze basse (1 – 80 Hz)

La distinzione è un po' convenzionale, ma

**i metodi di difesa dal rumore e dalle vibrazioni sono differenti.**



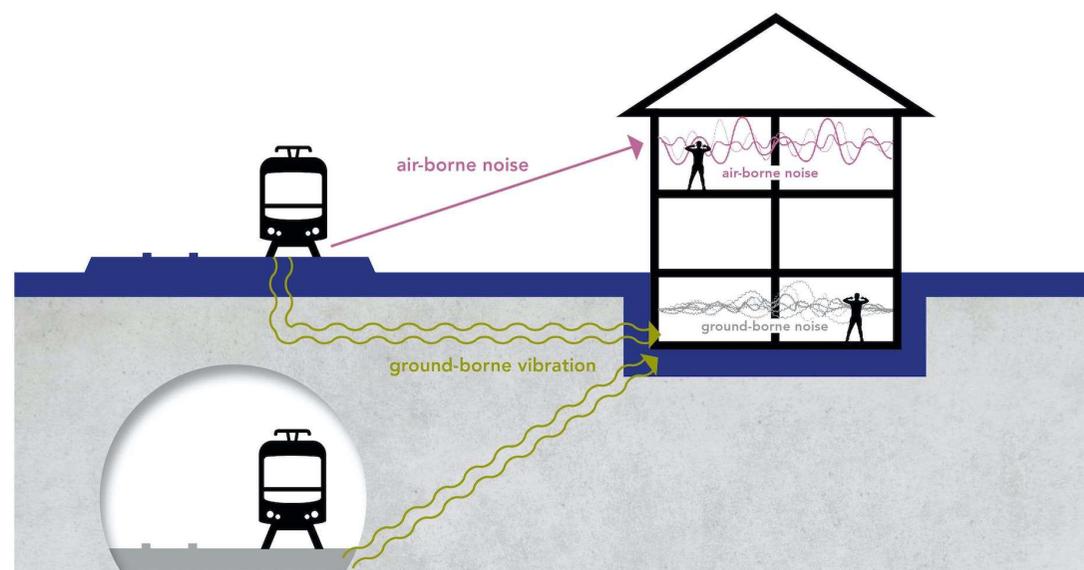
## VIBRAZIONE E RUMORE

Come per il suono, anche le vibrazioni sono caratterizzate da

- **Frequenza** (numero di cicli al secondo o Hz)
- **Ampiezza**, o intensità della vibrazione

Come detto, il campo di frequenze allo studio è limitato a valori fra 1 e 80Hz.

Il parametro che individua la «fastidiosità» della vibrazione è essenzialmente **l'ampiezza**.



**Esistono normative che fissano le soglie massime di ampiezza delle vibrazioni ammissibili nei diversi ambienti.**

## PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI - ESEMPIO

Si considera ad esempio una linea ferroviaria di superficie o una metropolitana, le cui vibrazioni si propagano nel terreno, interessando gli edifici circostanti.

**L'intensità, massima al punto sorgente, diminuisce progressivamente con la distanza.**



L'intensità delle vibrazioni immesse nel terreno **può essere ridotta con interventi alla sorgente**, ad esempio con la scelta di un **particolare tipo di armamento ferroviario**.

## RIDUZIONE DELLE VIBRAZIONI ALL'ORIGINE ESEMPIO: ARMAMENTO ISOLANTE

A Milano, le linee MM 1 e soprattutto 2, prive di misure di smorzamento a livello dell'armamento, trasmettono vibrazioni più ampie delle linee 3 e 5 (la 4 adotta lo stesso armamento della 5).

Queste ultime sono studiate in modo tale che **non trasmettono vibrazioni percepibili:**

**già all'origine la vibrazione è al di sotto della "soglia di percezione umana"**

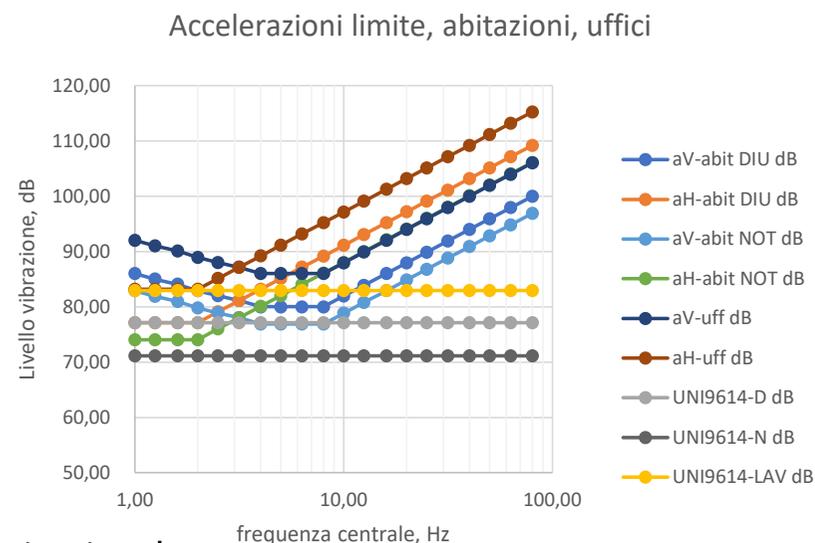
## LIMITI DI NORMATIVA ALLE VIBRAZIONI

Come per il suono, **esistono delle norme, che limitano l'ampiezza delle vibrazioni** accettabili negli ambienti residenziali e di lavoro.

Queste norme sono pensate sostanzialmente per **il benessere e il comfort umano**.

Ad esempio, il **Regolamento di Igiene del Comune di Milano** stabilisce dei limiti all'ampiezza delle vibrazioni verticali e orizzontali fra 1 e 80 Hz, individuando:

- a) **La soglia di percezione**, ovvero l'ampiezza minima percepibile
- b) **Le soglie di ammissibilità in ambienti residenziali** diurna e notturna
- c) **Le soglie di ammissibilità in ambienti di lavoro**.



**Chi progetta oggi un'opera che immette vibrazioni nel terreno, deve confrontarsi con queste soglie.**

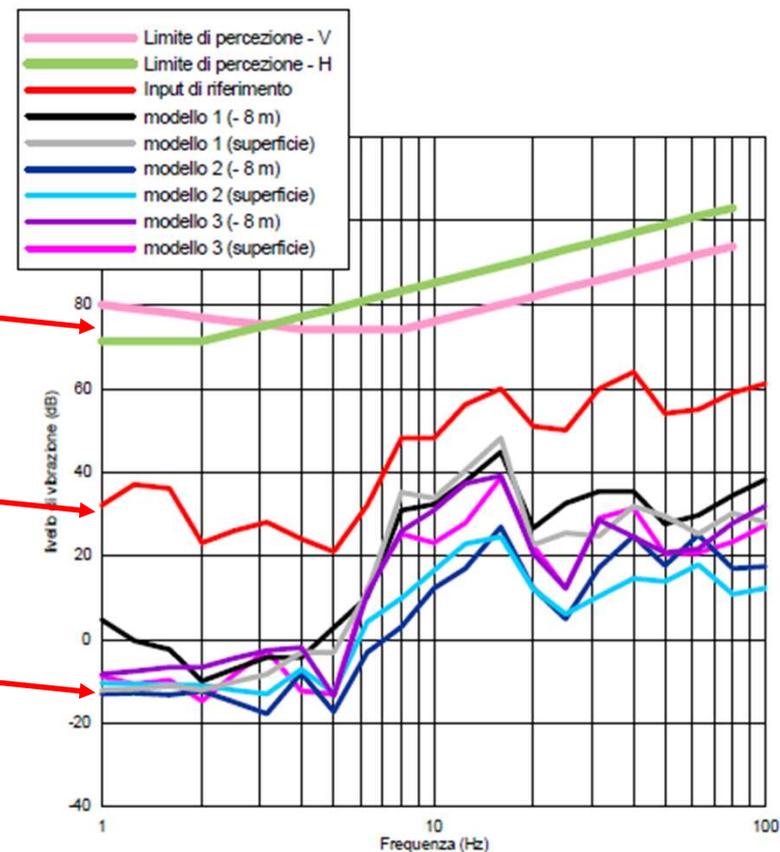
# LIMITI DI NORMATIVA - ESEMPIO

Progettazione di una linea metropolitana NUOVA

Limiti di normativa «soglia di percezione»

Segnale emesso alla rotaia

Segnale valutato in alcuni punti delle fondazioni di un edificio



Appare quindi evidente che, nel progettare una **struttura nuova**,

possono essere messi in campo tutti i  
**dispositivi necessari a**  
**mitigare le vibrazioni già all'origine,**

portandole all'interno delle soglie sopra descritte o anche, in previsione  
di una migliore

**futura sostenibilità,**

ovvero il rispetto di soglie ancora più restrittive.

## RIDUZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL LORO PERCORSO

Per contro, **ridurre le vibrazioni all'origine in una struttura preesistente** è sovente molto complesso, se non impossibile, e conviene quindi **agire con interventi di mitigazione**.

Ogni volta che abbiamo un cambio di materiale, terra – calcestruzzo o terra – aria, si hanno dei fenomeni di riflessione e rifrazione.

**Studiando opportunamente questi passaggi si possono ottenere considerevoli riduzioni**

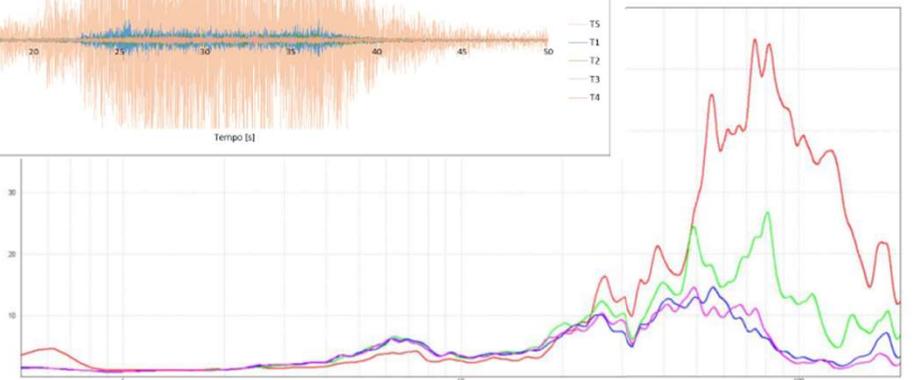
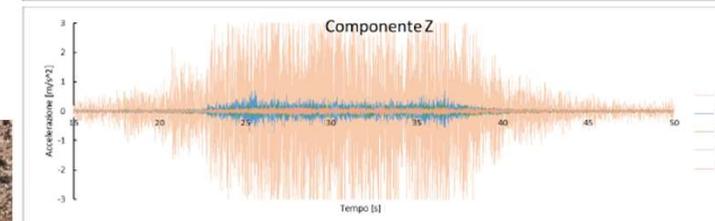
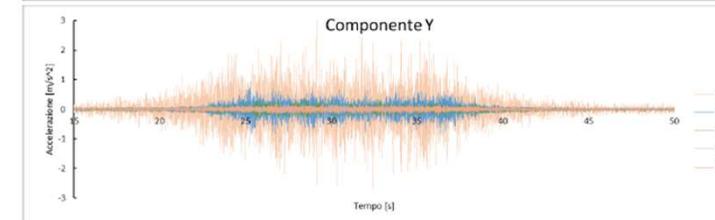
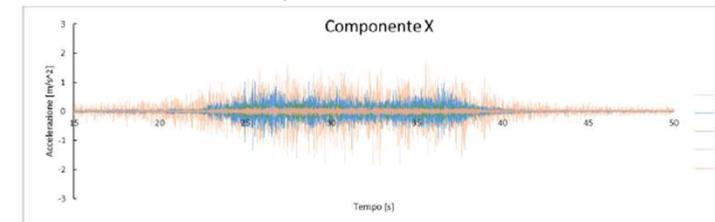
**localmente** delle ampiezze di vibrazione.

Si passa allora attraverso un preciso iter progettuale:

- **Misura sperimentale** delle vibrazioni in campo
- Valutazione dell'entità delle vibrazioni con **modelli numerici** (strumenti matematici)
- **Valutazione dell'efficacia** degli interventi in progetto con i medesimi «modelli»
- **Progettazione** esecutiva degli interventi
- **Verifica** in campo del raggiungimento dell'obiettivo

# MISURE SPERIMENTALI

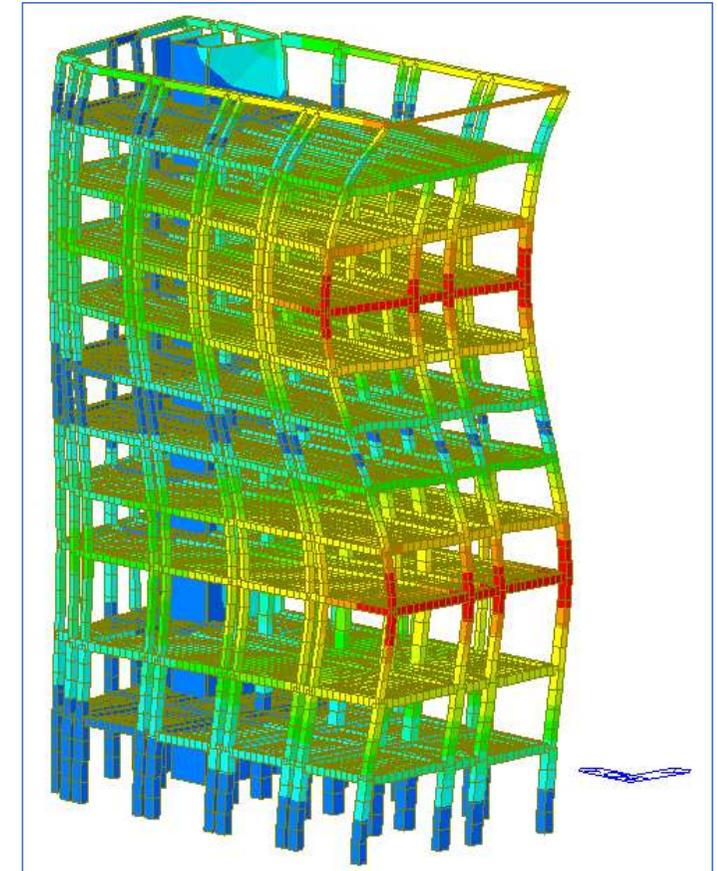
Mediante sensori posizionati sul o nel terreno



## CALCOLI NUMERICI

Su modelli matematici di simulazione

- dello **stato di fatto**, prima dell'intervento di mitigazione Fase di taratura del metodo di calcolo
- dello **stato di progetto**, dopo l'intervento, per valutare l'efficiacia dell'intervento stesso
- Le vibrazioni misurate in campo vengono assegnate come «**eccitazione**» al modello matematico che rappresenta il progetto e si misurano le ampiezze risultanti in punti specifici.
- (procedimento di analisi dinamica concettualmente simile all'analisi sismica)



## LE VIBRAZIONI E LO STADIO

Escludendo quindi il suono / rumore, quali sono le vibrazioni trasmesse da una struttura come uno stadio?

Si tratta di strutture in calcestruzzo armato o in acciaio, di **grandi dimensioni** e relativamente **snelle**, che possono vibrare in diversi «**modi**».



# LE VIBRAZIONI E LO STADIO -GLI EVENTI SPORTIVI

Essenzialmente la tribuna entra in vibrazione quando il pubblico **si muove a ritmo sulle gradinate**; a causa dell'elasticità di queste strutture, esse possono vibrare con ampiezze anche rilevanti se **l'eccitazione** (ovvero i movimenti della folla) avvengono con frequenze vicine alla loro propria **frequenza naturale**.



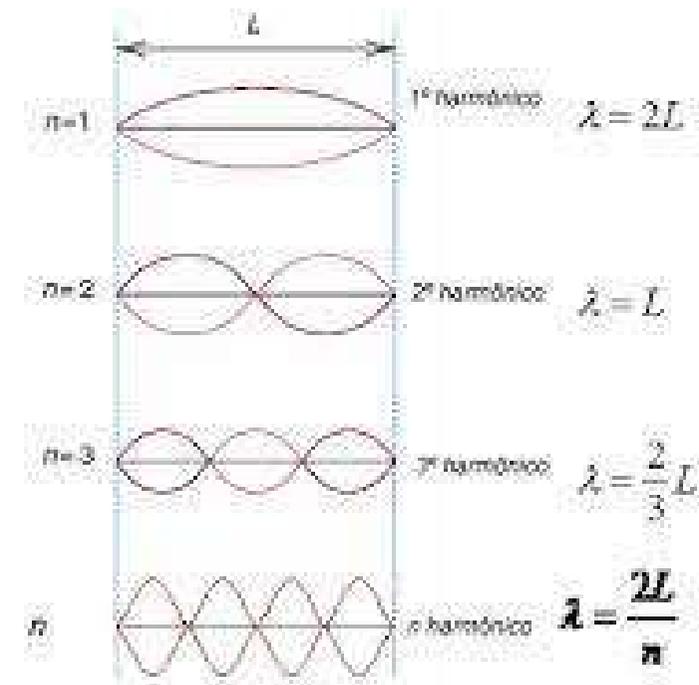
## LE VIBRAZIONI E LO STADIO

Per inciso: ogni corpo ha una o più **frequenze naturali**:  
pensiamo a una corda della vostra chitarra: se pizzicata,  
emette sempre la stessa nota

(stessa frequenza: Diapason = 432 Hz).

Per cambiare questa nota basta cambiare la tensione  
della corda, agendo sulla chiavella, oppure la lunghezza,  
agendo sulla tastiera).

Ecco, la tribuna dello stadio è analoga: ha una propria  
**frequenza fondamentale** che può cambiare solo se ne  
cambio la massa o la rigidità.



## LE VIBRAZIONI E LO STADIO – GLI EVENTI SPORTIVI

Quindi:

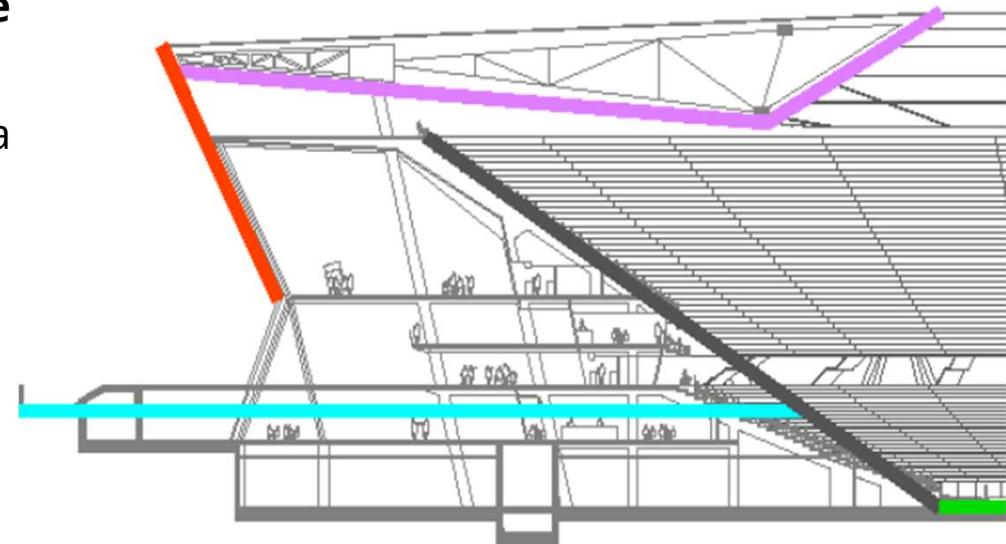
**se la tribuna è esistente, la frequenza fondamentale è predeterminata,**

**se la tribuna è in progetto, posso studiarla in modo da avere una determinata frequenza fondamentale.**

Le tribune dell'esistente Stadio di S. Siro hanno frequenze naturali di 2 o 3 Hz, **molto vicine alla frequenza con cui la gente «salta»**, mentre

**Nelle tribune in progetto, la frequenza obiettivo di progetto è di 5 Hz**, proprio per

**evitare la “risonanza” con il moto della folla.**



## LE VIBRAZIONI E LO STADIO – I CONCERTI

Oltre al suono e al movimento del pubblico, esiste un'altra sorgente di vibrazione, data dai **sub-woofer** la cui potenza, in occasione dei grandi concerti, può generare onde di pressione tali da indurre piccole vibrazioni strutturali.

Non si hanno evidenze sperimentali che queste vibrazioni (la cui energia è comunque piccola rispetto a quella di una massa di spettatori che si muove in sincronia), possano propagarsi in modo apprezzabile all'esterno della struttura. Tuttavia,

**anche questo tema può essere affrontato progettualmente.**

In tal caso, si può pensare a una **analogia** ai fenomeni di “blasting”, ovvero degli effetti di **onde d'aria, causati da esplosioni**, con contenuti energetici altissimi, e che è oggetto di una specifica branca dell'ingegneria.

L'effetto di un sistema di sub-woofer, **pur di una entità molto minore**, è sostanzialmente simile e può essere valutato con questi metodi.

## CONCLUSIONI

- 1) **Vibrazioni** = movimenti oscillatori **propagati dal terreno e dalla materia**, di frequenza inferiori a 80 Hz
- 2) Esistono precisi **limiti normativi all'ampiezza delle vibrazioni** prodotte da attività antropiche
- 3) L'ampiezza delle vibrazioni può essere **valutata sperimentalmente e calcolata** con i metodi dell'ingegneria
- 4) In una struttura nuova, l'ampiezza massima delle vibrazioni può essere definita come una **specificata di progetto**
- 5) In **uno stadio**, le vibrazioni possono essere prodotte dal **moto del pubblico** sulle tribune o da **apparecchi diffusori sonori** di grande potenza e bassa frequenza (sub-woofer)
- 6) Pur non essendo problemi diffusi (come ad esempio le vibrazioni indotte dai treni o dalle macchine operatrici), questo tipo di vibrazioni **può essere studiato progettualmente** con i metodi della dinamica strutturale.



**DIBATTITO PUBBLICO**  
STADIO MILANO

**VIBRAZIONI**  
CONCLUSIONI

**Grazie**



C E A S