LA SCIENZA DELLE COSTRUZIONI

LE FORZE AGENTI

LE DIVERSE PARTI O STRUTTURE RESISTENTI DI UNA COSTRUZIONE, DI SOLITO TRAVI E LASTRE, SONO SOLLECITATE DA FORZE DI VARIA NATURA. ALCUNE AGISCONO CONTINUAMENTE ED INVARIABILMENTE E COSTITUISCONO I CARICHI PERMANENTI. ALTRE FORZE AGISCONO INVECE NON CONTINUAMENTE E CON INTENSITÀ VARIABILE E COSTITUISCONO I CARICHI ACCIDENTALI.

LE FORZE SI CONSIDERANO "CONCENTRATE" QUANDO AGISCONO SU PUNTI ISOLATI DELLA SUPERFICIE DEL CORPO E "RIPARTITE" QUANDO AGISCONO SU ZONE ESTESE DI ESSA. A RIGORE NON ESISTONO FORZE CONCENTRATE; TUTTAVIA SPESSO CONVIENE CONSIDERARLE TALI QUANDO AGISCONO SU DI UN'AREA MOLTO RISTRETTA. PER CONTRO È UTILE CONSIDERARLE RIPARTITE QUANDO SONO COSTITUITE DA MOLTE FORZE PRESSOCHÈ CONCENTRATE, DISTRIBUITE CON UNA CERTA REGOLARITÀ, COME NEL CASO DELLA FOLLA.

LE FORZE SI DISTINGUONO ANCHE IN FORZE STATICHE QUANDO SONO COSTANTI, OPPURE VARIANO CON SUFFICIENTE LENTEZZA, COSÌ DA NON PRODURRE SCOSSE NELLA COSTRUZIONE; E IN FORZE DINAMICHE QUANDO SONO RAPIDAMENTE VARIABILI.

LE REAZIONI DEI VINCOLI

LE VARIE PARTI DI UNA COSTRUZIONE SONO VINCOLATE FRA LORO E COL SUOLO. OGNI SINGOLA PARTE, O UN GRUPPO DI ESSE, SI DICE LABILE SE I VINCOLI SONO SUFFICIENTI; ISOSTATICA SE SONO STRETTAMENTE SUFFICIENTI PER IMPEDIRE QUALUNQUE MOVIMENTO; IPERSTATICA SE SONO SOVRABBONDANTI.

PER STUDIARE UNA STRUTTURA RESISTENTE È NECESSARIO CONOSCERE TUTTE LE FORZE ESTERNE CHE LA SOLLECITANO. PERCIÒ, NOTI I CARICHI, OCCORRE ANZITUTTO DETERMINARE ANCHE LE REAZIONI DEI VINCOLI.

LE DEFORMAZIONI DEI CORPI

LO STUDIO DELLE DEFORMAZIONI PLASTICHE NON INTERESSA DUNQUE SOLTANTO PER SE STESSO, MA S'IMPONE STESSO NEL PROBLEMA FONDAMENTALE DELLA DEFORMAZIONE DELLE REAZIONI DEI VINCOLI; INOLTRE ESSO È NECESSARIO IN PROBLEMI PIÙ COMPLESSI (LASTRE, STABILITÀ DELL'EQUILIBRIO ELASTICO, VIBRAZIONI, ECC).

SI PUÒ QUINDI PENSARE LA DEFORMAZIONE DI UN CORPO COSTITUITA DI DUE PARTI: UNA DEFORMAZIONE ELASTICA CHE SCOMPARE AL CESSARE DELLA SOLLECITAZIONE CHE L'HA PRODOTTA E UNA DEFORMAZIONE PERMANENTE CHE RIMANE ANCHE DOPO.

TUTTAVIA, PER CERTI CORPI L'ESPERIENZA MOSTRA CHE SE LA SOLLECITAZIONE NON HA SUPERATO UN CERTO LIMITE, LA DEFORMAZIONE PERMANENTE È INAPPREZZABILE, CIOÈ AGLI ERRORI INEVITABILI DI OSSERVAZIONE. ENTRO TALE LIMITE, CHE CHIAMEREMO LIMITE DI ELASTICITÀ, E IN TAL SENSO, QUESTI CORPI POSSONO CONSIDERARSI ELASTICI, ANNULLANDO PRATICAMENTE LA DEFORMAZIONE AL CESSARE DELLA SOLLECITAZIONE.

LA LEGGE DI HOOKE

L'ESPERIENZA INSEGNA ANCHE CHE SE MISURIAMO LA DEFORMAZIONE DI UN CORPO PRODOTTA DA UNA FORZA GRADATAMENTE CRESCENTE, DA PRIMA ESSA VARIA IN MISURA PRATICAMENTE PROPORZIONALE ALLA FORZA, POI CRESCE PIÙ RAPIDAMENTE. SE DUNQUE NON SI SUPERA UN CERTO LIMITE, CHIAMATO LIMITE DI PROPORZIONALITÀ, LA DEFORMAZIONE È PROPORZIONALE ALLA FORZA AGENTE. QUESTA LEGGE, ENUNCIATA DA ROBERT HOOKE NEL 1678 NEI TERMINI "UT TENSIO SIC VIS", COSTITUISCE IL PRINCIPALE FONDAMENTO DELLA SCIENZA DELLE COSTRUZIONI.

METODO DEGLI SPOSTAMENTI

QUESTO METODO SPIEGA LA FINE DEL MODELLO DELL'EQUILIBRIO DEL CORPO RIGIDO E APRE LA STRADA AL MODELLO LINEARE DELL'EQUILIBRIO DEL CORPO ELASTICO, CIOÈ IN TALE METODO I CORPI, DEFINITI ELASTICI, SI DEFORMANO "POCO" SOTTO I CARICHI AGENTI.

VEDIAMO DI DESCRIVERE TALE METODO:
1) PRIMA DI TUTTO BISOGNA IDENTIFICARE LA ZONA DELLA STRUTTURA DOVE È CONCENTRATA LA DEFORMABILITÀ DELLA STRUTTURA.
2) A QUESTO PUNTO, IDENTIFICARE I PARAMETRI CHE IDENTIFICANO LA CONFIGURAZIONE VARIABILE DELLA STRUTTURA (I PARAMETRI LAGRANGIANI).
3) SUPPONIAMO CHE QUESTI PARAMETRI SIANO SUFFICIENTEMENTE PICCOLI, CIOÈ NON VISIBILI AD OCCHIO NUDO.
4) SUPPONIAMO CHE IL COMPORTAMENTO DEI MATERIALI SIA DEL TIPO ELASTICO - LINEARE:

$$N_i = K_i \cdot \partial l_i$$
$$K_i = \frac{EA}{l_i}$$

CON "$i = 1, \dots, n$" E "n" È IL NUMERO DI ASTE RETICOLARI. LA VARIAZIONE DI LUNGHEZZA "∂l" DIPENDE DAI PARAMETRI CHE IDENTIFICANO LA CONFIGURAZIONE VARIABILE O MEGLIO QUELLA DEFORMATA (O FINALE). GLI SFORZI TROVATI IN FUNZIONE DEI PARAMETRI LAGRANGIANI CHE IDENTIFICANO LA CONFIGURAZIONE VARIABILE LI SOSTITUIAMO NELLE 6 EQUAZIONI DELLA STATICA, CIOÈ EQUILIBRIO ALLA TRASLAZIONE VERTICALE ED ORIZZONTALE ED EQUILIBRIO ALLA ROTAZIONE RISPETTO AD UN POLO.

CORPI ELASTICI

CHIAMEREMO CORPI ELASTICI DEI CORPI LE CUI DEFORMAZIONI SONO PICCOLISSIME RISPETTO ALLE LORO DIMENSIONI, SONO TOTALMENTE ELASTICHE E VARIANO SECONDO LA LEGGE DI HOOKE. NON ESISTONO CORPI PERFETTAMENTE ELASTICI; TUTTAVIA, NEI LIMITI E NEL SENSO ACCENNATI, MOLTI CORPI SI POSSONO CONSIDERARE PRATICAMENTE ELASTICI.

INOLTRE, AMMETTEREMO CHE I CORPI ELASTICI DI CUI CI OCCUPIAMO SIANO ISOTROPI, OSSIA LE LORO PROPRIETÀ ELASTICHE SIANO UGUALI IN TUTTE LE DIREZIONI; CIÒ CHE SPESSO NON SI VERIFICA ESATTAMENTE, POICHÉ LA LAVORAZIONE DEI METALLI RENDE DIVERSE LE PROPRIETÀ ELASTICHE NELLE VARIE DIREZIONI. I CORPI FIBROSI COME IL LEGNO, LE ROCCE STRATIFICATE ED I CRISTALLI SONO ANISOTROPI.

LA TEORIA DELL'ELASTICITÀ

LO STUDIO DELLE DEFORMAZIONI DEI CORPI ELASTICI SI PUÒ RISOLVERE SEGUENDO

DUE CRITERI DIVERSI. LA TEORIA DELL'ELASTICITÀ CONSERVA NELLO STUDIO IL RIGORE MATEMATICO, MA DEVE LIMITARSI A CASI DI SOLITO MOLTO SEMPLICI E SCHEMATICI, I SOLI PER I QUALI SI RIESCE A DETERMINARE LA SOLUZIONE.

LA SCIENZA DELLE COSTRUZIONI INVECE RINUNCIA SPESSO A TALE RIGORE POCO FECONDO, PUR DI RISOLVERE IN MODO UTILE I PROBLEMI DELLA PRATICA. CIÒ SI CONSEGUE INTRODUCENDO IPOTESI PIÙ O MENO APPROSSIMATE PER RIDURRE I CASI REALI, DI SOLITO ASSAI COMPLESSI, A SCHEMI OPPORTUNAMENTE SEMPLIFICATI; OPPURE ESTENDENDO A CASI ANALOGHI PIÙ COMPLESSI L'USO DI RISULTATI OTTENUTI MEDIANTE LA TEORIA DELL'ELASTICITÀ PER CASI SEMPLICI: AD ESEMPIO, ACCETTANDO ANCHE PER TRAVI LEGGERMENTE CURVE O DI SEZIONE LENTAMENTE VARIABILE I RISULTATI OTTENUTI PER LE TRAVI PRISMATICHE.

LA SCELTA DI TALI IPOTESI SEMPLIFICATIVE VA FATTA CON CRITERIO, PER NON SOSTITUIRE AL CASO REALE UNO SCHEMA CHE DA ESSO SI SCOSTI TROPPO; COSÌ PURE SI USERÀ PRUDENZA NELL'ESTENDERE CERTI RISULTATI, LIMITANDOSI AI CASI PER I QUALI L'ESPERIENZA DIA UNA SICURA NOZIONE DELL'ENTITÀ DELL'ERRORE CHE SI PUÒ COMMETTERE. IN OGNI CASO LE IPOTESI SEMPLIFICATIVE DEVONO ESSERE A VANTAGGIO DELLA RESISTENZA; CIOÈ LO SCHEMA CHE SI STUDIA AL POSTO DEL CASO REALE, DEV'ESSERE IN CONDIZIONI PIÙ SFAVOREVOLI E GRAVOSE.

LE TENSIONI INTERNE

DETERMINATE LE REAZIONI DEI VINCOLI E NOTE COSÌ TUTTE LE FORZE AGENTI SUL CORPO, SI CERCANO LE TENSIONI ESISTENTI NELL'INTERNO DI ESSO. SE IMMAGINIAMO TRACCIATO PER UN PUNTO GENERICO NELL'INTERNO DEL CORPO UN ELEMENTO PIANO DI SUPERFICIE ARBITRARIAMENTE ORIENTATO, ATTRAVERSO QUESTO ELEMENTO IL MATERIALE CHE È DA UNA PARTE ESERCITA UNA FORZA O TENSIONE "t", GENERALMENTE OBLIQUA ALL'ELEMENTO, SUL MATERIALE CHE È DALL'ALTRA PARTE, E QUESTO ESERCITA SUL PRIMO UNA TENSIONE UGUALE E CONTRARIA. LA TENSIONE "t" HA QUINDI IN GENERALE UNA COMPONENTE "σ" NORMALE NELL'ELEMENTO (TENSIONE NORMALE) ED UNA COMPONENTE "τ" GIACENTE SU DI ESSO (TENSIONE TANGENZIALE), CHE S'INTENDONO RIFERITE ALL'UNITÀ DI AREA DELL'ELEMENTO STESSO. CIOÈ LE TENSIONI UNITARIE O SEMPLICEMENTE LE TENSIONI "σ" E "τ" SONO I VALORI DELLE FORZE CHE SI TRASMETTONO ATTRAVERSO UN'AREA UNITARIA, QUANDO LA LORO DISTRIBUZIONE È UNIFORME; SONO INVECE I QUOZIENTI DELLE FORZE ATTRAVERSO UN ELEMENTO INFINITESIMO NELL'INTORNO DEL PUNTO E L'AREA DELL'ELEMENTO, QUANDO LA DISTRIBUZIONE È VARIABILE.

LE TENSIONI "σ" E "τ", VARIABILI IN GENERALE DA PUNTO A PUNTO DEL CORPO E PER I DIVERSI ORIENTAMENTI DELL'ELEMENTO SUPERFICIALE, CARATTERIZZANO LO STATO DI TENSIONE DEL CORPO.

LA DETERMINAZIONE DELLE TENSIONI INTERNE

CONSIDERIAMO UNA TRAVE, OSSIA UN SOLIDO GENERATO DA UN'AREA PIANA CHE SI MUOVE NELLO SPAZIO IN MODO TALE CHE, PUR POTENDO VARIARE DI GRANDEZZA, DI FORMA E DI GIACITURA DURANTE IL MOTO, IL SUO BARICENTRO PERCORRA UNA DATA LINEA "s" E L'AREA SI MANTENGA COSTANTEMENTE NORMALE A QUESTA LINEA. ASSE GEOMETRICO DELLA TRAVE È LA LINEA "s", CIOÈ IL LUOGO DEI BARICENTRI DELLE SUE SEZIONI RETTE O NORMALI. L'ASSE GEOMETRICO PUÒ ESSERE UNA LINEA QUALSIASI NELLO SPAZIO, PERÒ DI SOLITO È UNA LINEA PIANA E SPESSO UNA LINEA RETTA (TRAVI AD ASSE RETTILINEO); LA SEZIONE RETTA PUÒ VARIARE MA SPESSO SI

MANTIENE COSTANTE (TRAVI DI SEZIONE COSTANTE). LA SEZIONE HA DI REGOLA DIMENSIONI MOLTO PICCOLE RISPETTO ALLA LUNGHEZZA DELL'ASSE.

SUPPONIAMO DI CONOSCERE GIÀ TUTTE LE FORZE ESTERNE AGENTI SULLA TRAVE, COMPRESE LE REAZIONI DEI VINCOLI. SE CONSIDERIAMO UNA SEZIONE "S", IL TRONCO DI TRAVE CHE LA PRECEDE È IN EQUILIBRIO. ESSO È SOGGETTO A TUTTE LE FORZE ESTERNE CHE PRECEDONO LA SEZIONE E AL COMPLESSO DELLE TENSIONI INTERNE, CHE, ATTRAVERSO QUESTA, GLI TRASMETTE IL TRONCO CHE SEGUE. SI CONCLUDE PERTANTO CHE LE TENSIONI TRASMESSE DA UN TRONCO DELLA TRAVE ALL'ALTRO TRONCO ATTRAVERSO LA SEZIONE COMUNE FANNO EQUILIBRIO ALLE FORZE ESTERNE AGENTI SU QUEST'ULTIMO.

QUESTA PROPRIETÀ GENERALE DELLE TENSIONI IN UNA SEZIONE SI RIFERISCE AL LORO COMPLESSO E NON BASTA PER DETERMINARE LA LORO DISTRIBUZIONE NELLA SEZIONE, CIOÈ I LORO VALORI IN OGNI PUNTO. LA PROPRIETÀ SUDDETTA È VALIDA NATURALMENTE NON SOLO PER LE TRAVI, MA ANCHE PER LE LASTRE E PER I CORPI DI FORMA QUALSIASI; TUTTAVIA, SOLTANTO PER LE TRAVI LE CONDIZIONI ELASTICHE AUSILIARIE SONO ABBASTANZA SEMPLICI.

LE CARATTERISTICHE DELLA SOLLECITAZIONE

LE FORZE ESTERNE AGENTI SUL TRONCO DI TRAVE CHE PRECEDE LA SEZIONE "S" (O SU QUELLO CHE LA SEGUE) POSSONO VARIARE IN INFINITI MODI PER NUMERO, PUNTI D'APPLICAZIONE, INTENSITÀ E RETTE D'AZIONE DELLE FORZE STESSE. PER EVITARE LO STUDIO DELLE TENSIONI INTERNE CASO PER CASO, SI SOSTITUISCONO A TALI FORZE ALCUNI TIPI DI SOLLECITAZIONI EQUIVALENTI. IN TAL MODO LO STUDIO SI RIDUCE A QUELLO DEI POCHI CASI SEMPLICI IN CUI AGISCONO SEPARATAMENTE TALI SOLLECITAZIONI; DOPO DI CHE, QUALUNQUE CASO COMPOSTO SI STUDIA SOMMANDO GLI EFFETTI PRODOTTI DALLE SINGOLE SOLLECITAZIONI.

A TAL FINE, FISSATA UNA SEZIONE "S" DELLA TRAVE, ASSUMIAMO UNA TERNA DI ASSI ORTOGONALI CON L'ORIGINE NEL BARICENTRO "G" DI "S", AVENTE L'ASSE "z" NORMALE AD "S" (COINCIDENTE PERCIÒ CON L'ASSE DELLA TRAVE SE RETTILINEO, O CON LA TANGENTE AD ESSO SE CURVILINEO) E GLI ASSI "x" E "y" NEL PIANO DELLA SEZIONE E COINCIDENTI COI SUOI ASSI PRINCIPALI D'INERZIA. LE FORZE CHE PRECEDONO LA SEZIONE "S" HANNO IN GENERALE SEI PARAMETRI: LE SOMME DELLE LORO COMPONENTI SECONDO GLI ASSI (ΣX, ΣY, ΣZ) CHE COSTITUISCONO TRE FORZE AGENTI SECONDO GLI ASSI STESSI, E LE SOMME DEI LORO MOMENTI RISPETTO AGLI ASSI (ΣM_x, ΣM_y, ΣM_z) CHE COSTITUISCONO TRE COPPIE AGENTI IN PIANI AD ESSI NORMALI.

QUESTI SEI PARAMETRI SONO LE SEI CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE E SI INDICANO RISPETTIVAMENTE CON "N, T_y, T_x, M_x, M_y, M_z". LA FORZA "N" SI CHIAMA SFORZO NORMALE O ASSIALE ED IL SUO EFFETTO NELL'INTORNO DI "S" È QUELLO DI STIRARE O DI COMPRIMERE LA TRAVE; LE FORZE "T_y" E "T_x" SI CHIAMANO SFORZI DI TAGLIO PERCHÈ TENDONO A TAGLIARE LA TRAVE SECONDO "S"; LA COPPIA "M_y" ED "M_z" SI CHIAMANO MOMENTI FLETTENTI PERCHÈ INFLETTONO LA TRAVE. PER L'EQUILIBRIO LE TENSIONI INTERNE NELLA SOLLECITAZIONE "S" DEVONO FARE EQUILIBRIO A QUESTE SEI SOLLECITAZIONI.

NEL CASO FREQUENTE DI TRAVI AVENTI L'ASSE GEOMETRICO CONTENUTO IN UN PIANO CHE CONTIENE ANCHE LE FORZE ESTERNE, SI ANNULLA "M_z", PERCHÈ LE FORZE INCONTRANO L'ASSE "z"; E SE INOLTRE LA SEZIONE "S" HA L'ASSE PRINCIPALE D'INERZIA "y" IN QUESTO PIANO, SI ANNULLANO ANCHE "T_x" ED "M_y". NEL CASO PARTICOLARE DI TRAVI AD ASSE RETTILINEO, SOGGETTE A

FORZE CONTENUTE IN UN PIANO CHE CONTIENE ANCHE L'ASSE "y" DELLA SEZIONE E NORMALI ALL'ASSE DELLA TRAVE, ESISTONO SOLTANTO "Ty" ED "Mx". SE INVECE LE FORZE SONO PARALLELE ALL'ASSE DELLA TRAVE RETTILINEA, ESISTONO "N" ED "Mx"; INFINE SE COINCIDONO CON L'ASSE, ESISTE SOLTANTO "N".

IL PRINCIPIO DI SAINT-VENANT

LA SOSTITUZIONE DELLE FORZE ESTERNE CHE PRECEDONO UNA SEZIONE "S" CON LE EQUIVALENTI CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE, DALLE QUALI SI DEDUCONO POI LE TENSIONI INTERNE NELLA "S", CORRISPONDE AD AMMETTERE CHE QUALUNQUE SISTEMA DI FORZE ESTERNE AVENTE GLI STESSI PARAMETRI PRODUCE LE STESSE TENSIONI.

È QUESTA UN'ESTENSIONE DEL PRINCIPIO AMMESSO DA BARRÈ DE SAINT-VENANT PER LE TRAVI SOGGETTE A FORZE APPLICATE SOLTANTO ALLE SEZIONI ESTERNE:

> "FATTA ECCEZIONE PER UN BREVE TRATTO INIZIALE DELLA TRAVE, LE TENSIONI INTERNE E LE DEFORMAZIONI NON MUTANO SE SI SOSTITUISCE UN SISTEMA DI FORZE ESTERNE CON UN ALTRO AVENTE GLI STESSI PARAMETRI."

IL PRINCIPIO DELLA SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI

LE FORZE APPLICATE AD UNA STRUTTURA PRODUCONO DIVERSI EFFETTI, CIOÈ REAZIONI DEI VINCOLI, TENSIONI E DEFORMAZIONI. A QUESTI CONVIENE AGGIUNGERE LE CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE, LE QUALI, PUR NON ESSENDO DEGLI EFFETTI, MA SOLTANTO DELLE QUANTITÀ CHE SI SOSTITUISCONO ALLE FORZE PER COMODITÀ, DIPENDONO ANCH'ESSE DALLE FORZE. CIASCUNO DI QUESTI EFFETTI SODDISFA AL SEGUENTE PRINCIPIO, DETTO DELLA SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI:

> "L'EFFETTO PRODOTTO DA PIÙ FORZE AGENTI CONTEMPORANEAMENTE È UGUALE ALLA SOMMA DEGLI EFFETTI PRODOTTI DALLE SINGOLE FORZE PENSATE AGENTI SEPARATAMENTE."

POICHÈ LE DIVERSE FORZE AGENTI SULLA STRUTTURA SI POSSONO PENSARE AGGIUNTE SUCCESSIVAMENTE, QUESTO PRINCIPIO SIGNIFICA CHE GLI EFFETTI DI UNA FORZA SONO INDIPENDENTI DALLA PREESISTENZA DI ALTRE FORZE; OSSIA CHE UNA FORZA APPLICATA AD UNA STRUTTURA GIÀ SOGGETTA AD ALTRE FORZE PRODUCE EFFETTI ULTERIORI UGUALI A QUELLI CHE PRODURREBBE APPLICANDOLA ALLA STRUTTURA SCARICA; PER CUI SUOI EFFETTI SI SOMMANO CON QUELLI GIÀ PRODOTTI DALLE FORZE PREESISTENTI.

SE LA STRUTTURA È STATICAMENTE DETERMINATA, PER GLI EFFETTI CHE EQUILIBRANO LE FORZE (REAZIONI E TENSIONI) O CHE EQUIVALGONO ALLE FORZE (CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE) L'INDIPENDENZA SUDDETTA È CONSEGUENZA SOLTANTO DEL FATTO CHE LE FORZE PREESISTENTI HANNO MODIFICATO POCHISSIMO LA FORZA DELLA STRUTTURA E CHE PERCIÒ LE NUOVE FORZE AGISCONO SULLA STRUTTURA RIMASTA PRESSOCHÈ UGUALE A QUELLA SCARICA; MENTRE PER GLI EFFETTI ELASTICI (DEFORMAZIONI) TALE INDIPENDENZA È CONSEGUENZA, OLTRE CHE DELLO STESSO FATTO, DELLA LEGGE DI HOOKE, PERCHÈ LA PROPORZIONALITÀ DELLE DEFORMAZIONI ALLE TENSIONI SIGNIFICA APPUNTO CHE UNA NUOVA TENSIONE UGUALE AD UN'ALTRA GIÀ AGENTE PRODUCE UN'ULTERIORE DEFORMAZIONE UGUALE A QUELLA GIÀ OTTENUTA. SE INVECE LA STRUTTURA È STATICAMENTE INDETERMINATA, E QUINDI LE REAZIONI DEVONO SODDISFARE, OLTRE ALLE CONDIZIONI D'EQUILIBRIO, ANCHE A CONDIZIONI ELASTICHE, IL PRINCIPIO IN QUESTIONE È SUBORDINATO ALLA VALIDITÀ DELLA LEGGE DI HOOKE, QUALUNQUE SIA L'EFFETTO CHE SI CONSIDERA.