

Curva intrinseca statica e flessione rotante sotto carico progressivo

È interessante segnalare, nel quadro dei nuovi indirizzi teorici e sperimentali delle prove sui materiali, i risultati ottenuti presso il Laboratorio Sperimentale dei Materiali da Costruzione del Politecnico di Torino, in una serie di esperienze sistematiche condotte, per la prima volta in Italia, su due macchine brevettate Prot:

— l'universale statica, dotata di dispositivo a pressione idraulica per la realizzazione di vari casi di sollecitazione, predisposti in vista del tracciamento della curva intrinseca dei materiali;

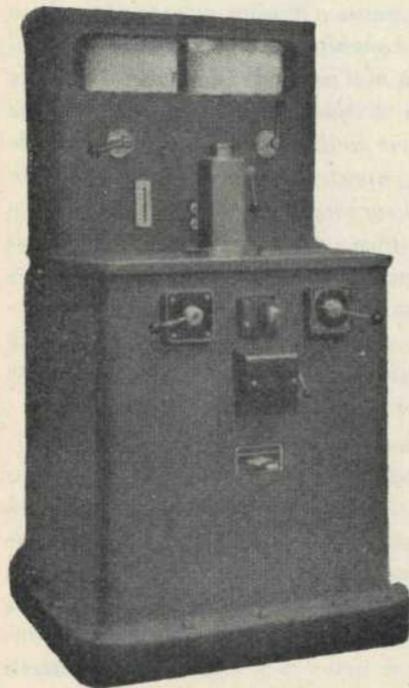
— l'universale dinamica, per l'esecuzione di prove di fatica a programma, dotata del dispositivo di carico progressivo ⁽¹⁾.

I principi di tali macchine derivano da un esame critico delle prove e delle macchine classiche, e dal proposito di rendere le prove dei materiali più rapide e più rispondenti alle esigenze della tecnica moderna.

Il Prot, procedendo da considerazioni di teoria probabilistica della sicurezza nelle costruzioni, mette in luce i punti

⁽¹⁾ L'esecuzione delle esperienze è stata resa possibile dalla cortesia della Soc. p. Az. Compensa Acciai, che ha concesso l'installazione delle macchine presso il Laboratorio Sperimentale dei Materiali da Costruzione del Politecnico di Torino.

Fig. 1. - La macchina statica universale Prot.



essenziali sui quali a suo avviso deve fissarsi l'attenzione dello sperimentatore: scelta del tipo di prova, al fine di conseguire dati chiaramente definibili ed interpretabili (ad esempio la misura della resistenza a trazione semplice ovvero a taglio puro è considerata preferibile alla misura della durezza o della resilienza); misura del valore medio osservato e degli scarti medi, rapidità e precisione della esperienza, opportuna scelta della forma della provetta.

Inquadrata così la singola prova con un maggior rigore scientifico, occorre stabilire un criterio di sintesi delle varie ricerche su di un materiale, in modo da fornire al calcolatore (che si trova generalmente di fronte a casi di sollecitazione statiti e dinamici più complessi) un quadro globale delle possibilità e dei limiti d'impiego del materiale stesso.

Il Prot, seguendo i concetti a suo tempo additati da Mohr e da Caquot, propone di caratterizzare le proprietà di resistenza del materiale mediante la curva intrinseca, ottenuta come involuppo dei cerchi di Mohr di rottura statica sotto diversi tipi di sollecitazione semplice: come si vede dalle Fig. 6-7-8, la curva intrinseca può essere facilmente tracciata conoscendo i cerchi di Mohr di trazione, taglio, compressione semplice ed il punto caratteristico della decoesione. Essa presenta in chiara sintesi le possibilità resistenti del materiale, che sono rappresentate da casi di sollecitazione corrispondenti a cerchi di Mohr interni all'involuppo.

Le informazioni deducibili dalla curva intrinseca statica possono essere utilmente integrate dalla curva intrinseca di fatica, che si sviluppa all'interno di quella statica e che completa l'analisi delle caratteristiche del materiale: anche il tracciamento della curva intrinseca di fatica è reso possibile utilizzando i risultati delle prove dinamiche effettuate sotto diversi tipi di sollecitazione.

Le macchine del Prot sono destinate a rendere facile e rapido il tracciamento di tali curve e consentono di utilizzare praticamente tale criterio di resistenza in luogo di altri meno facilmente caratterizzabili (sono ben note le critiche che si possono fare ai criteri ancora oggi impiegati, ad esempio quello della massima dilatazione e delle tensioni ideali).

Tracciamento della curva intrinseca di materiali metallici.

L'utilizzazione della teoria della curva intrinseca come criterio di rottura nei calcoli tecnici presentava gravi difficoltà per l'impossibilità di tracciare con esattezza un tratto esteso di curva involuppo dei cerchi di Mohr.

Con le macchine classiche si potevano eseguire le prove di trazione e compressione semplice, pur con riserve sulla

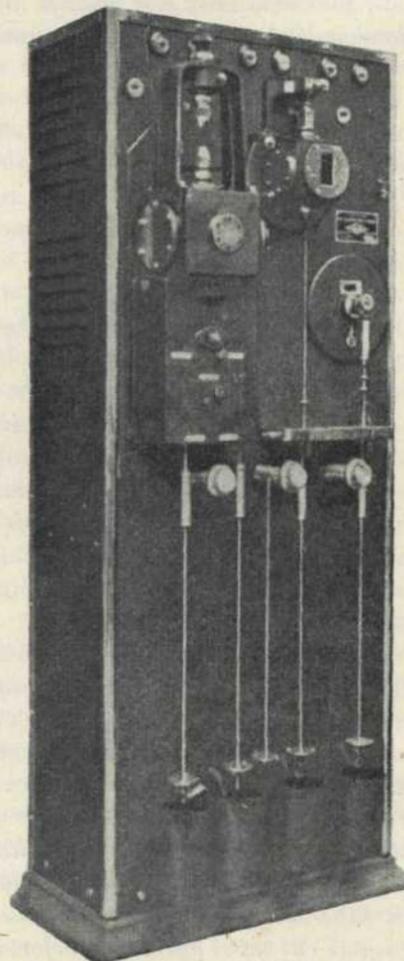
precisione dei risultati per la non perfetta centratura dello sforzo. Lo stesso si può dire delle prove di decoesione, molto sensibili alla scentratura del carico. Anche la sollecitazione di taglio puro ottenuta con la prova di torsione di un cilindro cavo dava luogo ad incertezze ed imprecisioni.

La macchina Prot rende assai più agevole l'operazione ricorrendo all'impiego di un dispositivo a pressione idraulica. Essa si fonda sul concetto di introdurre dell'olio in pressione in una camera cilindrica in cui viene adattata la provetta in modo che le teste stesse della provetta realizzino la chiusura della camera.

Mentre le prove di trazione e compressione non comportano novità di rilievo, tranne la perfetta centratura dello sforzo, per realizzare la sollecitazione di taglio si utilizza una provetta cilindrica cava che viene quindi sollecitata da una trazione longitudinale e da due compressioni, radiale (di valore pari alla pressione dell'olio che è al massimo di 2000 Kg/emq. e che si trascura essendo di valore modesto) e circonferenziale.

Giocando opportunamente sulle dimensioni geometriche del provino, si

Fig. 2. - La macchina di fatica universale Prot



PROVETTE DECOESIONE

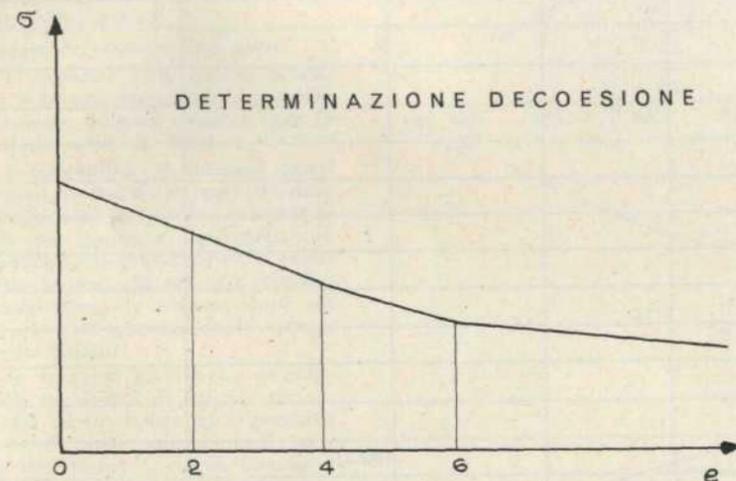
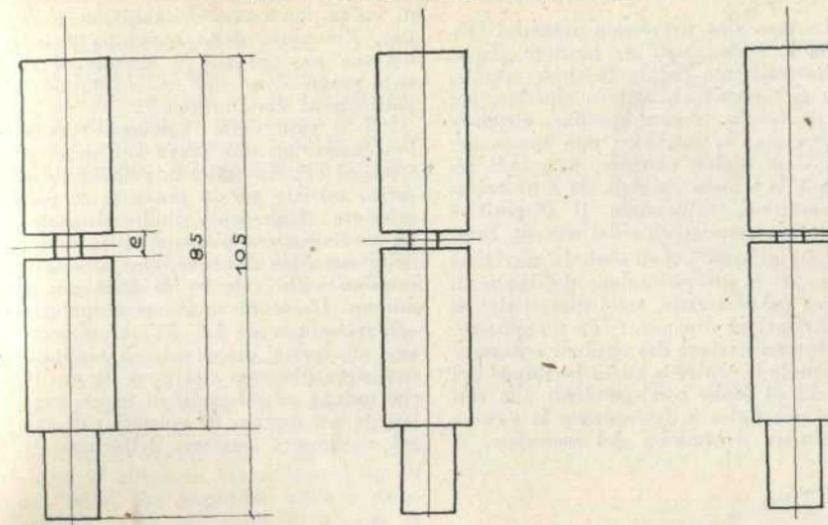


Fig. 3. - Serie di provette di decoesione e diagramma relativo.

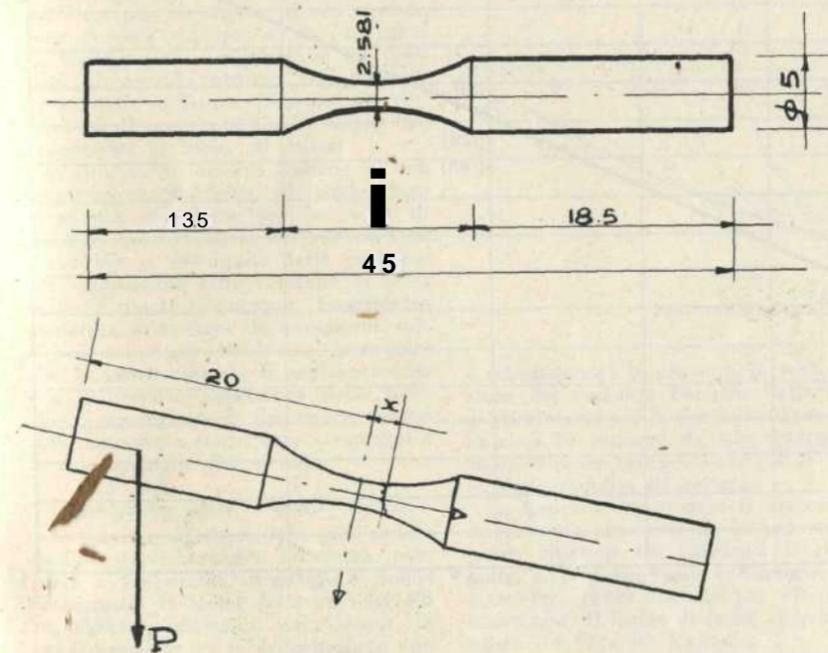


Fig. 4. - La provetta di flessione rotante. Schema per la determinazione dell'ascissa di rottura.

può fare in modo che le due tensioni principali (longitudinale e circonferenziale) siano uguali tra di loro e di segno opposto, realizzando così il taglio puro, ovvero che esse stiano tra di loro in rapporti semplici, si dà luogo a cerchi di Mohr variamente disposti rispetto all'origine degli assi.

Per stabilire il valore della decoesione si procede eseguendo prove di trazione su provette recanti, nella zona mediana, un intaglio di lunghezza variabile: l'interseco sull'asse delle σ del diagramma costruito portando in ordinate le σ di rottura in ascissa i valori crescenti della lunghezza dell'intaglio, fornisce il valore della decoesione. (Fig. 3).

Descrizione della macchina e risultati delle prove

La macchina è sostanzialmente costituita da una pompa a stantuffo, la cui portata è variabile mediante un cambio di velocità piazzato sul motore che aziona la pompa: l'olio in pressione viene inviato nella camera cilindrica di prova, in cui è sistemata la provetta. La lettura della pressione si effettua su un manografo registratore, che traccia un diagramma pressioni-tempo. (Fig. 1).

Le figure 6-7-8 riuniscono i risultati ottenuti nelle prime ricerche: esse sono state condotte su una ghisa (26/D) su un acciaio a basso tenore di carbonio trafilato a freddo (AB 40), su un acciaio legato al cromo nichel (V 2 B).

I risultati ottenuti mettono in evidenza il comportamento dei diversi materiali a questo tipo di prova. Dalla parte delle tensioni di trazione e fino al taglio puro, l'involuppo dei cerchi di Mohr darà la condizione di stabilità alla rottura: solo con gli acciai dolci ricotti, si potrà rilevare l'involuppo corrispondente allo snervamento.

Dalla parte della compressione l'involuppo dei cerchi di Mohr darà una condizione, di stabilità legata alla comparsa delle prime deformazioni permanenti ed alla forma della provetta (infatti nelle provette a pareti sottili si raggiunge l'instabilità per valori relativamente modesti della tensione).

Le curve intrinseche rivelano una netta differenziazione dei tre materiali studiati: la curva della ghisa è poco estesa sul lato della trazione, ed aumenta di ampiezza sul lato della compressione. Per gli acciai si nota una maggiore estensione dal lato della trazione ed una riduzione di ampiezza sul lato della compressione.

Il rapporto tra la resistenza al taglio puro e la resistenza alla trazione risulta essere rispettivamente di 0.80 per la ghisa di 0.61 per l'acciaio dolce, di 0.60 per l'acciaio legato. Dall'insieme delle esperienze sulla macchina statica universale Prot. in collaborazione con i Laboratori Centrali Ricerche e Controlli della FIAT, si possono formulare varie osservazioni: le prove di maggiore interesse sono quelle di taglio puro, di decoesione, nonché dei casi di sollecitazione composti adiacenti al taglio. Appare assai utile la perfetta centratura della provetta nelle prove di trazione e compressione. L'esecuzione delle provette è abbastanza laboriosa, data la notevole precisione

richiesta per le teste ($\pm 0,002$ mm.) ed una certa difficoltà nella esecuzione del foro interno alesato: si può ritenere, in media, che occorrono circa 8 ore di lavorazione per provetta. Al fine di ottenere indicazioni sulla resistenza trasversale dei materiali, parrebbe opportuno dotare la macchina di una attrezzatura che consenta di esercitare la pressione dall'interno della provetta, invece che solo dall'esterno. L'inventore ha d'altronde riconosciuto facilmente realizzabile tale completamento della macchina.

Il tempo richiesto per il tracciamento di una curva intrinseca si può stabilire in una giornata: ogni prova richiede infatti dagli otto ai dieci minuti di funzionamento a vuoto per estrarre l'aria dalla camera cilindrica e dai due ai tre minuti per giungere alla rottura della provetta.

Flessione rotante sotto carico progressivo

La macchina universale dinamica (Figura 2) è dotata di tre posti di prova, rispettivamente per la flessione rotante, per la torsione alternata o ripetuta, per la trazione e la compressione, alternate e ripetute: la macchina può funzionare sia sotto carico costante, e quindi secondo lo schema classico, sia sotto carico progressivo, utilizzando il dispositivo apposto, caratteristico del metodo Prot.

Nell'un caso e nell'altro la macchina consente la determinazione del limite di fatica del materiale, sotto diversi tipi di sollecitazione dinamica: con un'opportuna interpretazione dei risultati è dunque possibile costruire la curva involuppo dei cerchi di Mohr corrispondenti alla rottura per fatica e determinare la « curva intrinseca dinamica » del materiale. A

parte questa utile estensione del concetto di curva intrinseca al campo della fatica, l'interesse della macchina risiede nel suo impiego con il sistema di carico progressivo, che ne costituisce la particolarità caratteristica.

Per il caso della flessione rotante, l'esecuzione di una prova con detto sistema si effettua stabilendo anzitutto un carico iniziale per la provetta, di poco inferiore al presunto limite di fatica. La provetta viene piazzata nel mandrino della macchina di prova, che la pone in rotazione alla velocità di 2800 giri al minuto. L'asse di rotazione è inclinato sull'orizzontale di $11^{\circ}, 32'$. Il meccanismo di carico progressivo è realizzato con sfere d'acciaio del peso di gr. 10, che cadono ad intervalli di tempo regolati da un cambio di velocità collegato col movimento rotatorio della provetta.

Le velocità di aumento del carico disponibili sono le seguenti:

1 Kg/mm². ogni 10^6 cicli.

1 Kg/mm². ogni 10^5 cicli.

1 Kg/mm². ogni 10^4 cicli, e ciascuna di tali velocità può essere ulteriormente variata attraverso a valori intermedi disposti in progressione geometrica.

Raggiunta la rottura della provetta, si determina la tensione unitaria corrispondente tenendo conto della posizione della sezione di rottura come indicato nella figura.

Il valore trovato si riporta su un diagramma costruito portando in ordinate le tensioni di rottura, in ascisse le radici quadre delle velocità di aumento del carico. Effettuando varie prove a diverse velocità, si osserva che i punti caratteristici si allineano sensibilmente su di una retta, che intercetta sull'asse delle ordinate (corrispondente a velocità di aumento del carico nulla) il valore del limite di fatica cercato.

I vantaggi del metodo Prot sono:

— la rapidità della prova, la cui durata è notevolmente inferiore a quelle delle consuete a carico costante, per la ricerca della curva di Wöhler;

— la possibilità di ottenere punti sperimentali di una unica specie (è noto che il diagramma di Wöhler comprende punti di due specie, e cioè quelli che corrispondono alle provette rotte e quelli che corrispondono alle provette fermate, senza raggiungere la rottura, dopo un numero di cicli convenzionale precedentemente fissato);

— la maggior precisione, determinata dalla possibilità di definire un valore medio ed un indice di dispersione del limite di fatica, con un facile metodo di proiezione, e ciò in quanto il diagramma caratteristico è ad andamento pressoché rettilineo.

Le considerazioni teoriche sviluppate dal Prot per giustificare il suo metodo sono fondate sull'ipotesi che la curva di Wöhler sia assimilabile ad un'iperbole di secondo ordine, asintotica all'asse delle ordinate (tensioni di rottura) ed all'asse parallelo alle ascisse che rappresenta il limite di fatica.

Il Prot stesso osserva trattarsi di una prima approssimazione: adottando equazioni più complesse per la curva di Wöhler, si otterrebbero col metodo Prot curve che si discostano dalla retta ovvero rimangono rette variando la scala nelle ascisse. Comunque l'esperienza conferma assai bene le previsioni teoriche: noi stessi dobbiamo convenire che le prove eseguite in collaborazione con il Servizio Esperienze della RIV, che ci accingiamo a descrivere, hanno sufficientemente confermato i vantaggi e le caratteristiche del metodo.

Impostazione della ricerca e risultati

Le elevate caratteristiche dell'acciaio studiato (acciaio legato al cromo, temprato e rinvenuto), UNI-100-C6 hanno determinato la scelta della provetta FR 10, del tipo disegnato dal Caquot, in cui il rapporto tra la sollecitazione unitaria massima ed il carico applicato è pari a 10 (Figura 4). Nella stessa figura

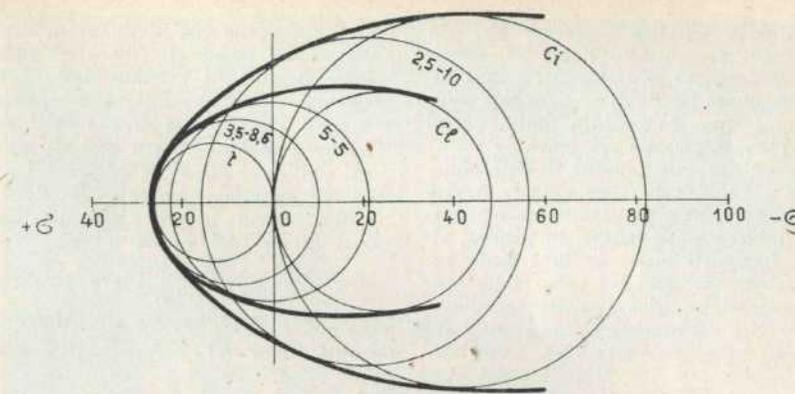


Fig. 6. - Curva intrinseca della ghisa 26/D.

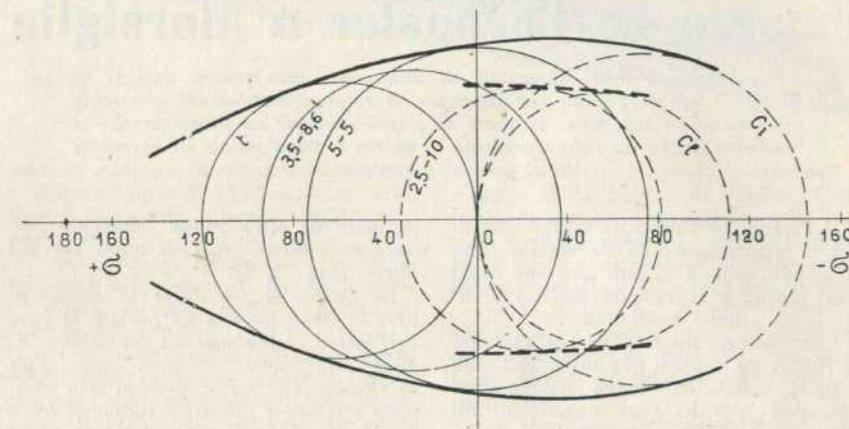


Fig. 7. - Curva intrinseca dell'acciaio legato al cromo nichel.

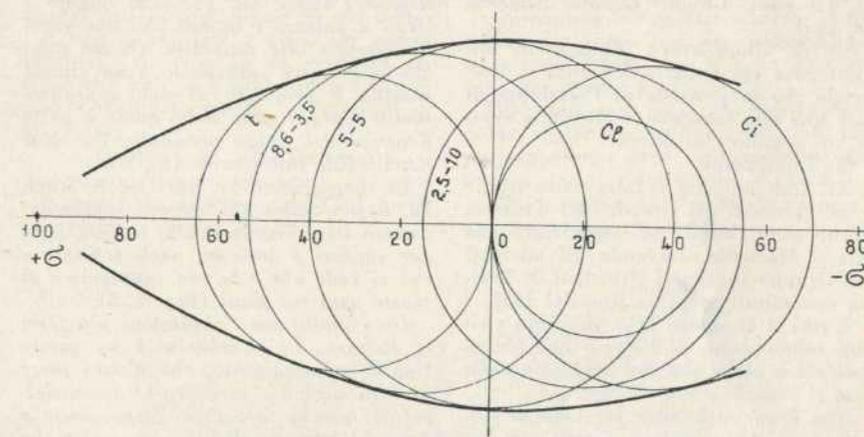


Fig. 8. - Curva intrinseca dell'acciaio a basso tenore di carbonio trafilato a freddo.

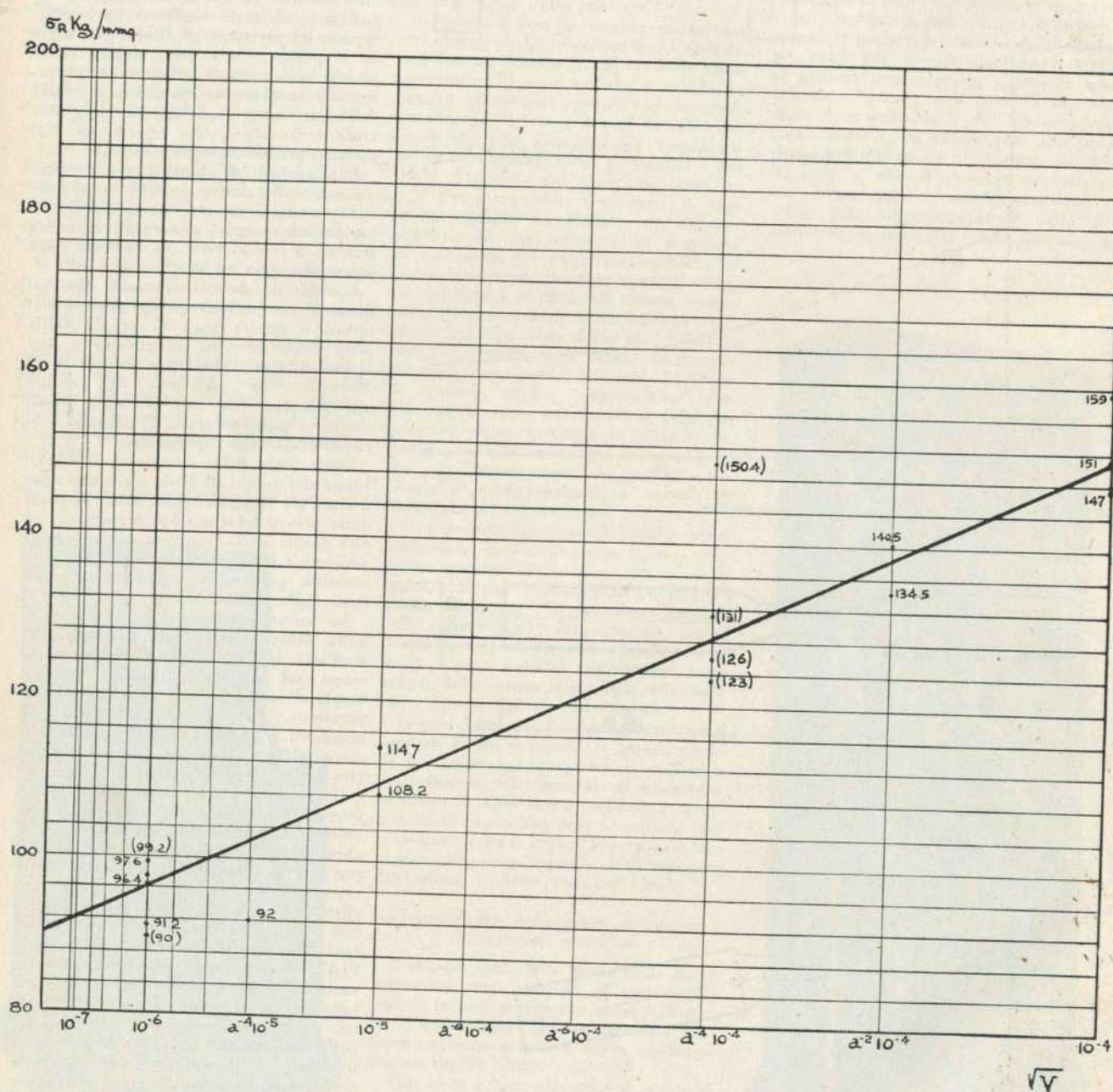


Fig. 5. - Diagramma delle prove di fatica a flessione rotante con carico progressivo su una serie di sedici provette d'acciaio al cromo temperato e rinvenuto. Ordinate: tensioni di rottura. — Ascisse: radici quadre velocità d'aumento del carico.

è schematizzata la provetta, la retta d'azione del carico e l'origine della retta di riferimento per la determinazione dell'ascissa di rottura: da tale determinazione si passa con un facile calcolo alla tensione unitaria di rottura.

La figura 5 rappresenta il diagramma ottenuto da una serie di 16 provette. I valori riportati tra parentesi si riferiscono a provette rotte nell'interno del mandrino, probabilmente per difetti di montaggio. Il limite di fatica si può stabilire tra 90 e 92 Kg/mm².

Una seconda serie di 14 provette ha fornito un risultato più elevato per il

limite di fatica, (circa 100 Kg/mm²) il che si spiega se si osserva che le rilevazioni di durezza Rockwell negli acciai delle due serie, hanno dato rispettivamente 64 per la prima e 66 per la seconda.

Il carico iniziale delle due serie è stato stabilito in 80 Kg/mm², le velocità di carico utilizzate sono indicate sul diagramma e comprendono praticamente tutte quelle disponibili.

Per un raffronto con i metodi classici può essere interessante rilevare che la durata delle prove relative alla serie di 16 provette è stata dell'ordine delle 500

ore: giova peraltro osservare che già dopo 60 ore (e cioè dopo la settima provetta rapida) si aveva una chiara indicazione del limite di fatica, che è stato ulteriormente confermato dalle successive prove a velocità più lenta.

Questa notevole rapidità di determinazione del limite di fatica è senza dubbio un dato di fatto di grande importanza. Sarà interessante studiare, in seguito, alcuni fenomeni messi in luce dalle osservazioni effettuate nel corso delle prove: così il significato della pendenza della retta caratteristica, connesso a fenomeni di allenamento del materiale,

così l'interpretazione delle rotture all'interno del mandrino (difetti di montaggio, ruggine di calettamento). Sarà opportuno inoltre studiare la convenienza di adottare una diversa scala per le ascisse, qualora fossero noti gli esponenti dell'iperbole di Wöhler caratteristica del materiale: infine confrontare i risultati ottenuti in prove effettuate con valori diversi del carico iniziale.

Ugo Piero Rossetti

Laboratorio Sperimentale dei Materiali
da Costruzione del Politecnico di Torino

BIBLIOGRAFIA

M. PROT, *Méthodes modernes d'essai des matériaux* - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Parigi - Novembre 1950 - N. 17.

M. PROT, *Mécanisme de charge progressive* - Académie de Sciences 225 - N. 16 - Parigi - Ottobre 1947.

Règles d'utilisation de l'acier - Ministère de la Reconstruction et de Turbanisme - 1946.

Palazzo Le Corbusier a Marsiglia

Si riportano i tratti essenziali di una conferenza tenuta dall'A. al Rotary Club di Torino per illustrare la celebre architettura che tante polemiche ha suscitato. Si tratta di impressioni di un uomo pratico e pertanto hanno un loro significato in mezzo a tante parole di sognatori e di persone impreparate.

Il Palazzo Le Corbusier a Marsiglia in via di ultimazione, ha interessato tutto il mondo civile e si può dire che quasi ogni giorno è visitato da studiosi e curiosi dei cinque continenti.

L'interessamento non poteva mancare al Rotary ed uno dei più importanti club d'Italia, quello di Milano, nell'ottobre-dicembre 1949 ha fatto oggetto di discussioni per ben quattro sedute il Palazzo di Marsiglia.

All'entusiasmo di Gio. Ponti e di Portaluppi ha fatto riscontro lo scetticismo di Albertini, Chiodi, Gadola, Semenza ed altri.

Sin da allora avevo pensato che miglior cosa era andarlo a vedere e ritenendo che la proposta di Portaluppi di fare una gita rotariana a Marsiglia avesse un seguito, ho atteso.

Ma inutilmente.

Nel frattempo ho seguito nelle riviste e nei giornali le vicende del Palazzo, finché sono riuscito ad organizzare una gita a Marsiglia, trovando gli aderenti nel Gruppo Ingegneri Urbanisti di Torino costituitosi verso la fine del 1951.

E così il 18 marzo 1952 potremmo visitare minutamente il Palazzo con alcuni colleghi e amici che del problema della casa si occupano e preoccupano.

Non è questa la sede per dettagli tecnici e mi limito quindi ai dati più importanti.

Il fabbricato che ha l'aspetto per taluni di un grande bastimento navigante nell'aria e pei critici non benigni di un enorme cassone alveare sui trampoli, sorge sulla bellissima Avenue Michelet di Marsiglia in mezzo a un parco di alberi giganti (figg. 1, 2).

Esso è costituito da un'ossatura in cemento armato che ha le seguenti dimensioni: lunghezza 137 mt., larghezza 24 mt., altezza 50 mt. con diciotto piani. Copre quindi una superficie di mq. 3.000 circa ed il suo volume si aggira sui 150.000 mc. vuoto per pieno. Corrisponde al volume di 1500-1600 camere effettive dei nostri comuni palazzi e può contenere quindi 1500-1700 abitanti. Ha

un peso di oltre 50.000 tonnellate con un carico medio di 1400 tonn. per pilastro (figg. 3, 4).

Le Corbusier per avere lo spazio libero a piano terreno ha portato la base dell'intero fabbricato ad un'altezza di circa otto metri, creando, come Egli lo chiama, « le sol artificiel ». Ben trentotto « pilotis » pilastri a forma di tronco di piramide rovesciata lo sostengono.

Come si vede dalle illustrazioni, ha concepito l'appartamento tipo principale come segue: un tubo a sezione rettangolare lungo mt. 24, ossia quanto è largo il palazzo e quindi con due grandi aperture alle estremità. Questo tubo che può essere paragonato a un grande cassetto è provvisto di una appendice messa sopra o sotto nella quale è posta l'entrata dal lungo corridoio, la così detta « Rue interieure » (fig. 3).

La disposizione dei vari locali: cucina, bagno, gabinetto, camera soggiorno, camera letto matrimoniale, camere letto per ragazzi è indicata negli schizzi in cui si vede che « la rue interieure » si ripete ogni tre piani (figg. 3, 5).

Dico subito che l'obbiezione più seria al Palazzo Le Corbusier è su questo tipo di appartamento, che d'altra parte gli era difficile modificare sostanzialmente, perché solo colla disposizione a forma di cassetto diritto e rovesciato ha potuto dotare l'appartamento della doppia aria.

Accenno appena agli altri tipi di alloggi, e cioè quelli per le persone sole, quelli costituenti camere di albergo in sostituzione della camere degli amici, e gli appartamenti per le famiglie numerose e per coppie di sposi senza bambini.

Per limitarmi a una succinta descrizione dirò che:

1) l'ingresso è organizzato come quello di un grande hotel con servizio di portiere, di corriere, di spedizioni e di ascensori;

2) una porta speciale permette l'accesso degli automobilisti, un'altra porta

è riservata alle spedizioni (livraisons), ai traslochi e all'uscita delle bare;

3) a metà altezza circa il palazzo contiene un centro commerciale ripartito su due piani serviti dagli ascensori (fig. 4). Al livello inferiore di questo centro esiste un grande magazzino di vettovagliamento comprendente tutti i necessari « comptoirs », al livello superiore la « rue commerciale » con tutti i negozi di commercio e degli artigiani e colla così detta « cafeteria » con servizio di bar e ristorante;

4) al disopra e al disotto dei pianerottoli degli ascensori che si fermano al livello della via interna, sono allestiti dei locali per i ritrovi giovanili (clubs de jeunesse). Al livello dei pianerottoli delle scale di soccorso, ci sono delle sale utilizzate per « les buanderies communes »;

5) a nord del palazzo vicino alla scala di soccorso è situato il montacarichi dei servizi comuni, che permette lo scarico e il carico diretto dei camion che arrivano al piano terreno;

6) la parte centrale del sottosuolo è utilizzata come garage, deposito biciclette, carrozzelle per bambini; le mamme con le loro carrozzelle o passeggini discendono o salgono dal piano sotterraneo al piano terreno per mezzo di montacarichi speciali, per non correre i pericoli della rampa che serve per le automobili e le biciclette;

7) la parte a nord del sottosuolo ospita le cantine dei servizi comuni (negozi, magazzini, caffè, bar etc.) e la parte a sud è utilizzata come sala delle macchine e depositi vari;

8) la metà del diciassettesimo piano sotto il tetto terrazzo è destinata al servizio di sanità e soccorsi d'urgenza, che comprende un dispensario di consultazione « une garderie jardin d'enfant » con pouponnière, sala di degustazione e distribuzione di latte. Nello stesso piano sono ricavate vaste sale di giochi educativi fra cui il salone cinematografico;

9) il diciottesimo piano costituente il tetto piano (toit ferrasse) forma un terreno di 2.700 mq. in pieno cielo. Esso è destinato ad esercizi fisici e ai giochi sportivi: una pista per corsa a piedi larga 3 mt. ha una lunghezza di 130 mt.; nello stesso piano vi è il giardino riservato ai bambini con una piccola piscina con pioggia artificiale e spiaggetta di sabbia (fig. 2).