



Indagine sperimentale sulle proprietà di resistenza
a fatica a trazione e a taglio di barre filettate
ancorate nel calcestruzzo mediante resina epossidica

Experimental survey on the tensile and shear
fatigue strength properties of threaded rods anchored
in concrete by means of epoxy resin

Prof. Ing. Paolo LAZZARIN^(), Dott. Ing. Francesco MUTIGNANI^(**),
Dott. Ing. Roberto RONCHI^(**), Dott. Ing. Angelo VITTOZZI^(***)*

1. Premessa

Recenti indagini sul comportamento delle barriere antirumore per le linee dell'alta velocità, hanno evidenziato come le sollecitazioni a fatica conseguenti al passaggio dei treni rappresentino il parametro "chiave" per il dimensionamento strutturale di tali opere. Risulta pertanto necessario determinare le proprietà di resistenza a fatica delle membrature delle barriere, al fine di operare un confronto tra soluzioni costruttive fra loro alternative. Il lavoro riassume i risultati di una campagna di prove volte alla determinazione del comportamento a fatica a trazione e a taglio di barre filettate in acciaio ancorate al calcestruzzo mediante resina epossidica bicomponente. Le barre in questione vengono utilizzate in alcune soluzioni tecniche per ancorare le piastre di base dei montanti di acciaio al-

1. Preliminary remarks

Recent analyses on the behaviour of noise protection barriers for the high-speed lines have highlighted that fatigue stresses following the transit of trains represent the "key" parameter for the structural sizing of such works. It is therefore necessary to determine the fatigue strength properties of the barriers' members, so as to make a comparison between structural solutions, alternative between each other. The work summarises the results of a test campaign aimed at defining the tensile and shear fatigue strength of steel threaded rods anchored to concrete by means of bicomponent epoxy resin. The rods concerned are used in some technical solutions to anchor the base plates of the steel columns to the foundations (for exam-

^(*) Università di Padova, sede di Vicenza - Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali, Professore ordinario di Costruzione di Macchine.

^(**) Fischer Italia Padova - Divisione grandi Clienti e Progetti.

^(***) Italferr - Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Strutture.

^(*) University of Padua, Vicenza headquarters - Industrial Systems and Technical Management Department, Full Professor for Machine Construction.

^(**) Fischer Italia Padua - Major Customers and Projects Division.

^(***) Italferr - Technical Management, Manager of Structures Operating Unit.

le fondazioni (ad esempio nelle applicazioni su opere esistenti). Le informazioni disponibili in letteratura risultavano molto carenti in relazione alle curve di riferimento per la progettazione a fatica. La rielaborazione statistica dei risultati ha consentito l'individuazione di due curve, una a trazione e una a taglio, corrispondenti a ben definite probabilità di sopravvivenza.

2. Introduzione

È oggetto di crescente interesse il comportamento a fatica di barre filettate di acciaio, ancorate al calcestruzzo mediante resina epossidica o adesivi di altro tipo [1, 2]. Un notevole impulso a tali applicazioni è legato alle problematiche conseguenti all'installazione di barriere antirumore lungo le linee ferroviarie dell'alta velocità della rete italiana (fig. 1). Nel percorrere la linea ferroviaria, il treno attraversa un fluido che aumenta la sua resistenza all'aumentare della velocità; il movimento provoca un campo di pressione ortogonale alla barriera antirumore. Tale campo, con legge sinusoidale, eccita la risposta dinamica della barriera mettendo alla prova la resistenza statica e a fatica di tutti i suoi componenti.

Le risultanze di una recente analisi teorico-sperimentale, coordinata da Italferr, per il dimensionamento di dette barriere, hanno portato a rianalizzare criticamente le regole di calcolo e a imporre, tra l'altro, la verifica a fatica come "key criterion" di tutti gli elementi strutturali (pannelli, montanti, ancoraggi etc.) [3].

Vista l'importanza della problematica tecnica, l'aspetto normativo è attualmente oggetto di studio anche a livello europeo (con il gruppo di lavoro CEN/TC226/WG6), con riferimento alla definizione dei protocolli per le prove a fatica.

In relazione alle verifiche strutturali, un aspetto ancora non bene definito è la verifica a fatica dei tirafondi di collegamento delle strutture portanti delle barriere acustiche, nel caso in cui gli stessi siano ancorati alle fondazioni in calcestruzzo tramite resine o prodotti equivalenti. La difficoltà risiede nel fatto che non esistono al momento normative che forniscano curve di riferimento per le verifiche a fatica per tale tipo di connessione.



Fig. 1 - Esempio di barriera antirumore utilizzata sulle linee AV/AC di RFI. *Example of a noise barrier used on HS/HC lines of RFI.*

ple in applications on existing works). The information available in literature was very lacking in relation to the reference curve for fatigue design. The statistic elaboration of the results allowed the identification of two curves, for tensile and shear loads, corresponding to well-defined probabilities of survival.

2. Introduction

The fatigue behaviour of threaded steel rods anchored to the concrete through epoxy resin or other types of adhesives [1, 2] are of growing interest. A great impulse to such applications is related to the problems following the installation of noise protection barriers along the high-speed railway lines of the Italian network (fig. 1).

When travelling along the line, the train goes through a fluid that increases its resistance as the speed increases; the movement causes a pressure field that is orthogonal to the noise protection barrier. Such field, with sinusoidal law, excites the dynamic response of the barrier involving the static and fatigue strength of all of its components.

The results of a recent theoretical and experimental analysis coordinated by Italferr, for the sizing of these barriers, have led to critically analyse again the calculation rules and to force, among other things, the fatigue verification as "key criterion" of all the structural elements (panels, columns, anchorages etc.) [3].

In the light of the importance of the technical problem, the regulatory aspect is currently a study object also at a European level (with the CEN/TC226/WG6 workgroup), also in relation to the definition of specifications for fatigue tests.

With reference to the structural verifications, an aspect that is still not well defined is the fatigue check of the connection anchor bolts of the bearing structures of the noise protection barriers, in case the same are anchored to the concrete foundations with resins or equivalent products. The difficulty lies in the fact that there are currently no regulations that give reference curves under fatigue loading for such type of connection.

This type of connection can be applied in particular cases, such as for example, when the manufacture has been built without planning for appropriate installations and it is therefore necessary to operate afterwards in the least possible invasive way.

The static and dynamic analysis of the noise protection barrier stresses that are subject to pressure/depression actions due to the transit of the train, has highlighted a variation in the stress parameters at the foot of the columns located near the base plate (a bending moment and shear), a variation that in turn reflects on the manufacturer's anchor bolts, in a different manner according to how the fixing has been conceived and designed. In most frequent cases (fig. 2), the anchor bolts are stressed mainly by a normal load variation; in rarest cases (fig. 3), when

Questa tipologia di collegamento trova applicazione in casi particolari, ad esempio, quando l'opera d'arte è stata realizzata senza prevedere le opportune predisposizioni ed è quindi necessario intervenire a posteriori nel modo meno invasivo possibile.

L'analisi statica e dinamica delle sollecitazioni delle barriere antirumore soggette ad una azione di pressione-depressione dovuta al passaggio del treno, ha evidenziato come al piede dei montanti, in prossimità della piastra di base sia presente una variazione dei parametri di sollecitazione (momento flettente e taglio), variazione che a sua volta si ripercuote sui tirafondi di ancoraggio all'opera d'arte, in maniera differente a seconda di come l'attacco è stato pensato e progettato. Nei casi più frequenti (fig. 2), i tirafondi sono sollecitati sostanzialmente da una variazione di tensione normale; in casi più rari (fig. 3), in cui la carpenteria metallica "abbraccia" l'opera d'arte (ad esempio la testa di un muro), le piastre verticali di attacco trasferiscono principalmente sollecitazioni di taglio nei tirafondi.

Lo stato tensionale complessivo ha reso necessarie opportune sperimentazioni, prima a trazione, poi a taglio, al fine di determinare le curve di progetto con ben definite probabilità di sopravvivenza.

3. Sintesi dei risultati dei test di fatica a trazione

I risultati delle prove di trazione sono stati già presentati in un recente contributo [4] al quale si rimanda per maggiori dettagli. È sufficiente qui precisare che la sperimentazione ha inizialmente preso in esame barre filettate (M16 e M30, classe 8.8), annegate in fori ottenuti mediante tubo corrugato di acciaio avente diametro interno costante di 40 mm e profondità di inghisaggio di 400 mm e 800 mm. In questi casi era stata impiegata una resina epossidica bicomponente FIS EM. La stessa resina è stata utilizzata anche nel caso di barre M20 e M30 di classe 8.8 con profondità di ancoraggio pari, rispettivamente, a 170 mm e 280 mm (tabella 1).

Tali barre sono state installate secondo una procedura che prevedeva in successione: l'esecuzione del foro, le sequenze standard di pulizia del foro, l'iniezione della resina e, infine, inserimento della barra filettata (fig. 4). Prima dell'applicazione dei carichi di fatica sono stati rispettati i tempi minimi di attesa indicati nel manuale tecnico del produttore (FISCHER) [5].

Sono stati utilizzati blocchi di calcestruzzo non armato aventi classe di resistenza certificata C20/25, in accordo, con il valore minimo di riferimento nelle linee guida europee ETAG [6] in materia di applicazioni strutturali con ancoranti chimici.

Tutti i campioni sono stati sottoposti a prove di fatica a trazione con rapporto nominale di ciclo prossimo a zero. Alle barre non è stata applicata alcuna coppia di ser-

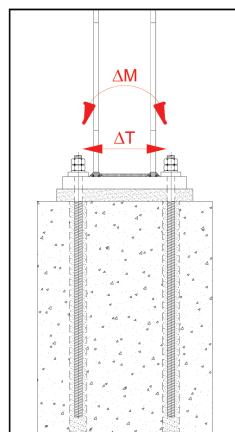


Fig. 2 - Collegamento classico di un montante di una barriera antirumore sull'opera d'arte, ad esempio su cordolo di viadotto o su fondazione in rilevato. *Typical connection of a noise protection barrier column on the manifold, for example on the viaduct riddle or on embankment foundation.*

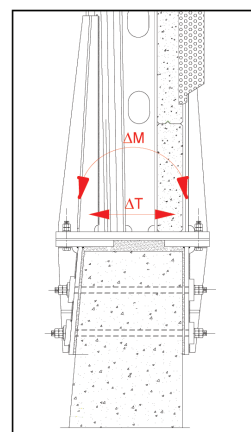


Fig. 3 - Caso particolare di collegamento di un montante di una barriera antirumore sull'opera d'arte, ad esempio su testa muro in cls. *Particular connection case of a noise protection barrier connection to the manifold, for example on the wall head in concrete.*

the steel structure "embraces" the manufacture (for example the head of a wall), the vertical fixing plates mainly transfer shear stresses on anchor bolts.

The overall tensile condition, has made appropriate experimentations necessary, first under tensile loads, then under shear loads, so as to determine the project curves with well defined survival probabilities.

3. Summary of the tensile fatigue test results

The results of the tensile tests have already been presented in a recent contribution [4] to refer to for further details. It is sufficient to point out here that the experimentation initially examined threaded rods (M16 and M30, class 8.8), embedded in holes made with a steel corrugated tube with an internal constant diameter of 40 mm and a grouting depth of 400 mm and 800 mm. In this case a FIS EM bicomponent epoxy resin was used. The same resin was also used in case of M20 and M30 class 8.8 rods with an anchorage depth equal to 170 mm and 280 mm respectively (table 1).

Such rods were installed according to a procedure that progressively planned for: drilling of the hole, hole cleaning standard sequences, injection of the resin and lastly, the introduction of the threaded rod (fig. 4). Before applying the fatigue loads, the minimum curing time indicated in the manufacturer's technical handbook were observed (FISCHER) [5].

TABELLA 1 – TABLE 1

CARATTERISTICHE DELL'ANCORAGGIO PER LE BARRE FILETTATE M20 E M30 (A TRAZIONE E A TAGLIO). ANCHORAGE CHARACTERISTICS FOR THE M20 AND M30 THREADED RODS. (TENSION AND SHEAR)

Caratteristiche dell'ancoraggio <i>Anchorage characteristics</i>		M20	M30
Diametro del foro <i>Diameter of the hole</i>	d_o [mm]	24	35
Profondità di foratura <i>Depth of the hole</i>	h_o [mm]	175	285
Profondità min. di ancoraggio <i>Minimum anchorage depth</i>	h_{ef} [mm]	170	280
Resistenza del calcestruzzo <i>Concrete strength</i>		C20/25	C20/25

raggio. Tale scelta è dovuta alla necessità di evitare un pre-carico nelle barre stesse: lo stesso, infatti, gioca un ruolo benefico nel comportamento a fatica del sistema, in quanto garantisce la non decompressione della piastra nelle condizioni di esercizio; questo fa sì che gli incrementi di trazione nel gambo dei tirafondi non siano mai direttamente proporzionali al carico esterno, ma restino sempre percentualmente modesti, in quanto la forza di trazione esterna viene assorbita per la restante quota parte dal primo precompresso piastra/cl.

Fenomeni di ritiro e di fluage nel tempo del calcestruzzo, possono portare a una sensibile riduzione delle coppie di serraggio dei tirafondi, e a un maggiore coinvolgimento delle barre filettate nell'assorbimento dei carichi esterni applicati.

Tutte le indagini sperimentali a fatica sono state effettuate presso i laboratori sperimentali Fischer di Denzlingen (Germania). La macchina di prova (fig. 5) era costituita da un telaio metallico provvisto di un attuatore idraulico Walter+Bai AG in grado di fornire una forza statica max di 250 kN e una forza dinamica max di 200 kN (Rapporto di fatica $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \approx 0$), quest'ultima con frequenza limite di applicazione del carico pari a 15 Hz. Le prove sono state monitorate in continuo registrando la forza applicata alla barra, gli spostamenti assiali del sistema di fissaggio, la temperatura e il numero di cicli. Un particolare relativo alla zona di aggancio della barra è mostrato in fig. 6.

È fondamentale precisare che il meccanismo di rottura è rimasto invariato in tutti i test effettuati: le rotture a fatica si sono verificate sistematicamente in corrispondenza del primo filetto in presa della barra, sotto il dado, per effetto d'intaglio (fig. 7).

Il meccanismo di rottura è rimasto inalterato anche per

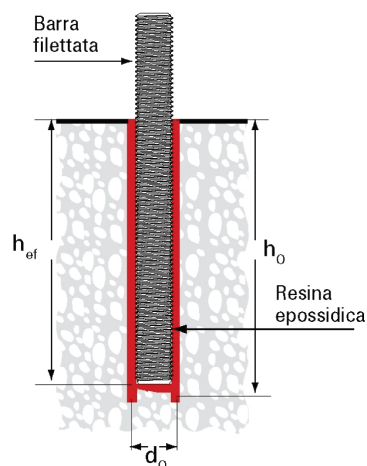


Fig. 4 - Schema dell'ancoraggio per le barre filettate M20 e M30. (a trazione e a taglio). Anchorage sketch for M20 and M30 threaded rods. (tension and shear). (Threaded rod - Epoxy resin).

Unreinforced concrete blocks were used with C20/25 certified strength class, in accordance with the minimum reference value in the ETAG [6] European guidelines concerning structural application with bonded anchors.

All samples were subjected to tensile fatigue tests with nominal load ratio near to zero. No tightening torque was applied to the rods. This choice is due to the need to avoid a preload in the rods themselves: in fact, the same plays a beneficial role in the system's fatigue behaviour since it guarantees the non decompression of the plate in operating conditions; therefore the stress increases in the anchor bolts are never directly proportional to the external load but always remain a modest percentage, since the external tensile force is absorbed for the remaining share by the pre-compressed prism plate/concrete.

Concrete shrinking and creep phenomena in the course of time may cause a sensible reduction of the anchor bolt tightening torque and greater involvement of the threaded rods in absorbing the external loads applied.

All experimental fatigue tests were carried out at the Fischer plant laboratories in Denzlingen (Germany). The test machine consisted of a steel frame with a Walter+Bai AG hydraulic actuator capable of supplying a maximum static force of 250 kN and a maximum dynamic force of 200 kN (Fatigue ratio $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \approx 0$), the latter with load application frequency limit equal to 15 Hz. The tests were continuously monitored recording the force applied to the rod, the axial displacements of the fixing system, the temperature and the number of cycles. A detail of the rod anchoring area is illustrated in fig. 6.

It is essential to point out that the failure mechanism



Fig. 5 - Dispositivo di prova per sollecitazione di trazione. Test device for tensile stress.

zo (a 70 mm): non si è verificata alcuna riduzione delle proprietà di resistenza a fatica rispetto ai test condotti su campioni ancorati al centro del blocco.

I risultati della prova di fatica a trazione sulle barre M16, M20 and M30 sono illustrati nella fig. 8 in termini di range di tensione nominale applicata $\Delta\sigma$ e numero di cicli totali a rottura N. Un confronto con la curva di progetto proposta in EC3 per i bulloni e barre filettate (FAT50) mette in evidenza come tutti i dati sperimentali relativi alle barre M16, M20 ed M30 (queste ultime non zincate) si collochino molto al di sopra del riferimento suggerito dalla Norma EC3. Valori di maggiore sicurezza si presentano soprattutto ad alto numero di cicli.

Il comportamento delle barre filettate M30 con trattamento superficiale di zincatura elettrolitica si è mostrato non in linea con tutti gli altri risultati sperimentali, come evidenziato nel diagramma $\Delta\sigma$ - N di fig. 8. La loro resistenza a fatica è risultata inferiore ai campioni precedenti, seppure superiore alla curva di progetto dell'EC3. Il fattore di riduzione in termini di $\Delta\sigma$ nominale risulta a 2×10^5 cicli leggermente inferiore a 2.0, e quindi superiore a quanto atteso esclusivamente per effetto scala.

In assenza di dati in letteratura tecnica relativi a questo tipo di applicazione che ha visto l'impiego di un ancorante chimico (FIS EM), è stato ritenuto comunque utile operare un confronto con altri dati sperimentali resi disponibili da altri ricercatori.

È importante comunque osservare come le modalità di rottura non varino rispetto a quelle rilevate nella presente indagine, con innesco delle cric-



Fig. 6 - Particolare aggancio barra. Detail of bar hooking.

i tre campioni M30 posizionati molto vicino al bordo del blocco in calcestruzzo

block (at 70 mm): there is no reduction in the fatigue strength properties compared to the tests performed on samples anchored at the centre of the block.

The results of tensile fatigue tests on M16, M20 and M30 rods are illustrated in fig. 8 in terms of nominal stress range ($\Delta\sigma$) and the number of total cycles to failure (N). A comparison with the reference curve proposed in EC3 for bolts and threaded rods (FAT50) highlights how all the experimental data related to M16, M20 and M30 rods (the last one being not zinc-coated) are very much above the reference value suggested in the EC3 Code. Greater safety values can be found above all at a high number of cycles.

The behaviour of the M30 threaded rods with superficial electrolytic zinc-coating was found to be not in line with all the other experimental results, as highlighted in the $\Delta\sigma$ - N diagram in fig. 8. Their fatigue strength appeared lower than the previous samples, even though above the EC3 reference curve. The reduction factor in terms of nominal $\Delta\sigma$ appears to be slightly lower than 2.0 at 2×10^5 cycles and therefore above expectation with reference only to the scale effect.

In the absence of technical literature data related to this type of application with the use of bonded anchors (FIS EM), it was in any way thought useful to make a comparison with other experimental data made available by other researchers.

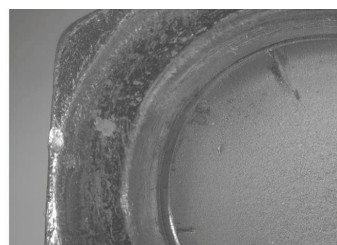
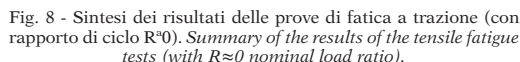


Fig. 7 - Superficie di frattura, con innesco della cricca in corrispondenza del primo filetto in presa, sotto il dado (barra filettata M20). Fracture surface with crack initiation in correspondence of the first connection thread, underneath the nut (M20 threaded bar).

remained unchanged in all the tests performed: fatigue failures occurred systematically in correspondence of the first thread in the rod connection, underneath the nut, due to the notch effect (fig. 7).

The failure mechanism is also unchanged for three M 30 samples placed very close to the edge of the concrete



Gli ulteriori dati di resistenza riguardavano:

- test di fatica relativa agli ancoraggi Fischer FHB dyn realizzati con l'ancorante chimico Fischer FIS HB; tali test erano stati effettuati a R=0 da Block e Dreier [2,8]);
- test su barre M16 in classe 8.8 con R=0 del carico (Block e Dreier [9]);
- test su viti TE M16 in classe 5.8 con R=0 (Majzoobi et al. [10]);
- altri test su unioni bullonate M20 classe 8.8 (Wells [11]);
- test sperimentali su barre filettate M10 42CrMo4, classe 8.8 (FARES et al. [12]).

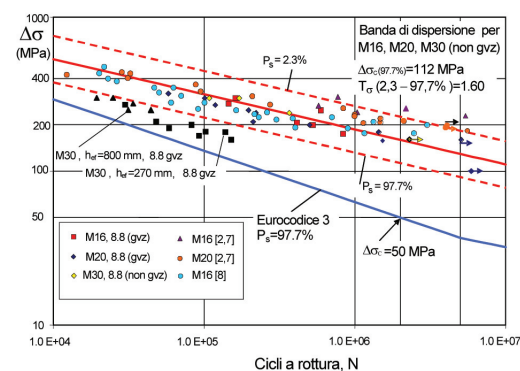
INGEGNERIA FERROVIARIA

- fatigue tests related to the Fischer FHB dyn anchorages produced with the Fischer FIS HB bonded anchors; such tests were performed at R=0 from Block and Dreier [2.8]);

- tests on M16 class 8.8 rods with $R=0$ of the load (Block and Dreier [9]);
- tests on TE M16 class 5.8 screws with $R=0$ (Majzoobi et al. [10]);
- other tests on M20 class 8.8 bolted joints (Wells [11]);
- experimental tests on M10 42CrMo4, class 8.8 threaded rods (FARES et al. [12]).

The statistic analysis of the new results, together with those taken from the literature, have allowed to determine the new scatter band for rods having a diameter equal to or less than 20 mm (fig. 10).

The value of the reference range at two million cycles turned out to be equal to $\Delta\sigma_{\text{C}}=112$ MPa, with a survival



0 - 3/2011

teressare il calcestruzzo. I risultati del confronto sono presentati in fig. 9.

L'analisi statistica dei nuovi risultati, insieme a quelli tratti dalla letteratura, ha consentito la determinazione di una nuova banda di dispersione per barre di diametro uguale o minore di 20 mm. (fig. 10). La rielaborazione ha preso in esame anche i dati a fatica relativi alle barre M30 non zincate, che avevano evidenziato una resistenza del tutto compatibile con quella delle serie di diametro inferiore.

Il valore del range di riferimento a due milioni di cicli è risultato essere pari a $\Delta\sigma_c=112$ MPa, con una probabilità di sopravvivenza $P_s=97.7$ % (valori medi sperimentali meno due deviazioni standard). La pendenza inversa della banda è risultata leggermente superiore a 4.0, contro una pendenza 3.0 suggerita dall'EC3.

4. Nuovi risultati di prove di resistenza a fatica a taglio

Una nuova campagna di prove è in corso di effettuazione presso i laboratori della Fischer di Padova e di Denzlingen (Germania). Vengono qui presentati i risultati completi dei test di fatica a taglio già effettuati su barre filettate M20. La geometria dei campioni era in accordo con quella già illustrata in tabella 1 per i test a trazione. È stata impiegata la stessa resina epossidica bicomponente, FIS EM 390 S, e sono stati utilizzati blocchi di calcestruzzo non armato aventi classe di resistenza certificata C20/25, in accordo con il valore minimo di riferimento nelle linee guida europee ETAG [6] in materia di applicazioni strutturali con ancoranti chimici.

Il dispositivo di prova utilizzato presso la Fischer di Padova è mostrato in fig. 11. È evidente che la sollecitazione di taglio è applicata tramite un piatto d'acciaio che agisce sulla testa della barra tramite una boccia di diametro pari a 20-21 mm. La barra è stata precaricata applicando una coppia costante di valore $T_s=300$ Nm. Al fine di ridurre drasticamente l'attrito presente tra barra e blocco di calcestruzzo, è stato inserito un foglio sottile di teflon (0,5 mm), fig. 12.

I risultati dei test di fatica a taglio sono riportati in tabella 2 in termini forza massima, forza minima applicata e relativo range. Nota la sezione netta resistente delle barre ($A_{res} = 245$ mm²), il range di forza è stato espresso in termini di $\Delta\tau$ nominale. Per ciascun range di tensione di taglio, la tabella 2 dà il valore sperimentale del numero di cicli a rottura.

I dati sperimentali relativi alle rot-

probability of $P_s=97.7$ % (average experimental values minus two standard deviations). The inverse slope of the band turned out as being slightly higher than 4.0, against a 3.0 gradient suggested by the EC3.

4. New results of shear fatigue strength tests

There is an ongoing new test campaign underway in the Fischer laboratories in Padua and in Denzlingen (Germany). The complete results of the shear fatigue tests already carried out on M20 threaded rods are reported here. The geometry of the samples was in agreement with the one already illustrated in Table 1 for the tensile tests. The same FIS EM 390 S bicomponent epoxy resin was used and unreinforced concrete blocks with C20/25 certified strength were used, in accordance with the minimum reference value in the ETAG [6] European guidelines concerning the structural applications with bonded anchors.

The test device used at Fischer in Padua is illustrated in fig. 11. It is evident that the shear stress is applied through a steel plate that acts on the head of the rod through a bushing with a diameter equal to 20-21 mm. The rod has been pre-loaded by applying a constant torque with a value of $T_s=300$ Nm. In order to reduce the friction between the rod and the concrete block drastically, a thin Teflon sheet (0,5 mm) has been introduced, fig. 12.

The results of the shear strength tests are reported in table 2 in terms of maximum force, minimum force applied and related range.

The net resistant section of the rods being known ($A_{res} = 245$ mm²), the force range has been converted in terms of nominal $\Delta\tau$. Table 2 reports the experimental value of the number of cycles to failure for each shear stress range.



Fig. 11 - Dispositivo di prova per sollecitazione di taglio. Test device for shear stress.



Fig. 12 - Particolare del collegamento. Detail of the connection.

TABELLA 2 – TABLE 2

RISULTATI DELLE PROVE DI FATICA SULLE BARRE M20 CLASSE 8.8 ($A_{res} = 245 \text{ mm}^2$). RAPPORTO NOMINALE DI CICLO $R \approx 0$. COPPIA DI SERRAGGIO $T_s = 300 \text{ Nm}$; CLASSE DEL CALCESTRUZZO C20/25; DIAMETRO BOCCOLA = 20-21 mm). IL CODICE 'nr' INDICA PROVINI NON ROTTI AL NUMERO DI CICLI INDICATO. RESULTS OF THE FATIGUE TESTS ON CLASS 8.8 M20 RODS ($A_{res} = 245 \text{ mm}^2$). LOAD NOMINAL RATIO $R \approx 0$. TIGHTENING TORQUE $T_s = 300 \text{ Nm}$; C20/25 CONCRETE CLASS; AXLE DIAMETER = 20-21 mm). THE 'nr' CODE INDICATES RUN-OUTS AT THE SPECIFIED NUMBER OF CYCLES.

Prov. Specimen N°	F_{max} (kN)	F_{min} (kN)	ΔF (kN)	$\Delta \tau$ (MPa)	Numero cicli a rottura Number of cycles to failure
1	55.5	1.5	54	220.41	15.100
2	51.5	1.5	50	204.08	23.500
3	46.5	1.5	45	183.67	33.101
4	43.5	1.5	42	171.43	30.901
5	43.5	1.5	42	171.43	29.802
6	41.5	1.5	40	163.27	63.900
7	39.5	1.5	38	155.1	246.504
8	37.5	1.5	36	146.94	125.799
9	36.5	1.5	35	142.86	145.652
10	35.5	1.5	34	138.78	591.905
11	31.5	1.5	30	122.45	492.853
12	31.5	1.5	30	122.45	5.462.501 (nr)
13	29.5	1.5	28	114.29	5.145.000 (nr)
14	24.5	1.5	23	93.88	5.830.000 (nr)

ture a fatica a N cicli, sono stati rielaborati statisticamente, utilizzando una distribuzione log-normale, secondo procedure consolidate [13,14]. I provini *run-out* a oltre 5 milioni di cicli sono stati esclusi dalla rianalisi statistica.

I risultati sono illustrati in fig. 13, laddove è tracciata anche la curva di riferimento suggerita dall'EC3 per il materiale base soggetto a sollecitazioni di taglio, in assenza di effetto d'intaglio. Tale curva presenta, come ben noto, un valore di riferimento $\Delta \tau (97,7\%) = 100 \text{ MPa}$ e una pendenza inversa $k = 5,0$.

La banda di dispersione relativa alle barre oggetto di sperimentazione è stata valutata con riferimento a un livello di probabilità di sopravvivenza del 10-90%, in accor-

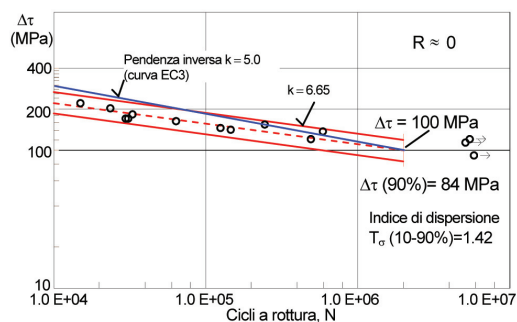


Fig. 13 - Risultati delle prove a fatica a taglio e banda di dispersione associata. Shear fatigue test results and associated scatter band.

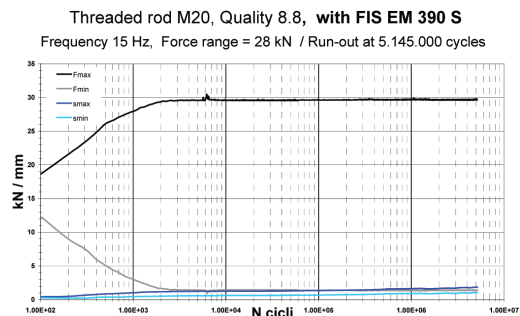


Fig. 14 - Andamento dei valori massimo e minimo della forza applicata e della rigidità in funzione del numero di cicli. Minimum and maximum values of the force applied and of the stiffness according to the number of cycles.

The experimental data related to the fatigue failures at N cycles has been statistically elaborated by using a log-normal distribution, according to consolidated procedures [13,14]. The *run-out* specimens at over 5 million cycles have been excluded from the statistic re-analysis.

The results are illustrated in fig. 13, where the reference curve suggested by the EC3 is traced for base material subject to shear stress, in the absence of notch effects. As it is well known, this curve has a reference value of $\Delta \tau (97,7\%) = 100 \text{ MPa}$ and an inverse slope of $k = 5,0$.

The scatter band related to the rods subject to experimentation has been evaluated with reference to survival probability level equal to 10-90%, in accordance with the Haibach band, so as not to penalise the distribution tails with a number of useful data equal to 11. The 3 run-outs at over 5 million cycles however exceed the indicated reference value, $\Delta \tau = 84 \text{ MPa}$ ($P_s = 90\%$). It is useful to remember, as in the case of the welded joints, how the survival probability ranging from 90% to 97.7% implies a reduction factor equal to 1.12. In the light of these considerations,

do con la banda di Haibach, al fine di non penalizzare le code della distribuzione in presenza di un numero di dati utili pari a 11. I 3 run-out a oltre 5 milioni di cicli risultano comunque superiori al valore di riferimento indicato, $\Delta\tau=84\text{MPa}$ ($P_s=90\%$). È utile ricordare come, nel caso delle unioni saldate, il passaggio da una probabilità di sopravvivenza dal 90% al 97.7% comporti una fattore di riduzione pari a 1.12. Alla luce di queste considerazioni, riteniamo, in termini ingegneristici, che il valore di riferimento per $P_s=97.7$ dovrebbe assestarsi intorno ai 75 MPa. Si osservi infine come la pendenza inversa sia risultata molto vicina a quella suggerita dall'EC3, 6,65 contro 5,0.

Un tipico diagramma di rigidità relativo a un giunto non rotto a oltre 5 milioni di cicli è visualizzato in fig. 14. In relazione alle modalità di rottura, queste sono risultate variabili in funzione dell'entità del carico applicato. In presenza di carichi elevati, la rottura ha sistematicamente interessato la barra d'acciaio, con evidente ovalizzazione della sede (fig. 15). Ad alto numero di cicli, si manifestava invece il cedimento del calcestruzzo, ma in presenza di una contemporanea fessurazione della barra (fig. 16).

5. Conclusioni

Sono stati riassunti i risultati di prove a fatica di trazione eseguite su barre filettate (M16, M20 and M30, classe 8.8) annegate nel calcestruzzo mediante resina epossidica FIS EM. Sono stati poi presentati e discussi i risultati di nuovi test di fatica a taglio effettuati su barre filettate M20, utilizzando la stessa resina e lo stesso tipo di calcestruzzo (C20/C25).

Tutti i campioni testati a trazione hanno evidenziato la medesima modalità di rottura, indipendentemente dal diametro e dalla profondità di ancoraggio: il cedimento si è manifestato sistematicamente sulle barre di acciaio per effetto d'intaglio, con inizio in corrispondenza del primo filetto impegnato sotto il dado. La resistenza a fatica delle barre M16 e M20 è risultata superiore a quella suggerita dall'EC3 (FAT50) per bulloni e barre filettate soggette a fatica. È stata determinata una nuova banda di dispersione analizzando i nuovi risultati insieme a molti altri tratti dalla letteratura tecnica. Il valore di riferimento a due milioni di cicli è risultato essere $\Delta\sigma_C=112\text{ MPa}$ (con riferimento ad una probabilità di sopravvivenza $P_s=97.7\%$) per barre di diametro uguale o minore di 20 mm. La pendenza inversa della banda è risultata leggermente superiore a 4,0, contro una pendenza 3,0 suggerita dall'EC3.



Fig. 15 - Modalità di rottura a carichi elevati. Failure mode with heavy loads.



Fig. 16 - Modalità di rottura a basso carico. Failure mode with low loads.

we believe that, in engineering terms, the reference value for $P_s=97.7$ should settle around 75 MPa. It should be observed how the inverse slope is very close to the one suggested by the EC3, 6.65 against 5.0.

Fig. 14 illustrates a typical stiffness diagram related to an unbroken joint at over 5 million cycles. With reference to the failure modes, these appear to be variable according to the size of the load applied. With high loads, the failure systematically involved the steel rod, with evident ovalization of the seating (fig. 15). On the other hand, with a high number of cycles settlement of the concrete was observed, although with contemporary cracking of the rod (fig. 16).

5. Conclusions

The results of tensile fatigue tests performed on threaded rods (M16, M20 and M30, class 8.8) embedded in concrete by means of FIS EM epoxy resin have been summarised. Results of new fatigue shear tests on M20 threaded rods have been presented and discussed, using the same resin and the same type of C20/C25 concrete.

All tensile samples tested have shown the same failure mode, regardless of the diameter and of the anchoring depth: the subsidence systematically occurred on the steel rods as a consequence of the notch effect, starting in correspondence of the first thread under the nut. The fatigue strength of the M16 and M20 rods exceeded the one suggested by the EC3 (FAT50) for bolts and threaded rods subject to fatigue. A new scatter band was determined by analysing the new results together with many others taken from technical literature. The reference value at two million cycles was $\Delta\sigma_C=112\text{ MPa}$ (with reference to a survival probability of $P_s=97.7\%$) for rods having a diameter equal to or less than 20 mm. The inverse slope of the band slightly exceeded 4.0, against a slope of 3.0 suggested by the EC3.

Tutte le barre filettate con diametro nominale pari a 30 mm e soggette a zincatura superficiale hanno mostrato una resistenza a fatica inferiore a quella dei campioni sopra citati, in relazione al regime di vita a fatica esplorato, $N < 2 \times 10^5$ cicli. Per le barre M30 la curva di progetto a trazione fornita dall'EC3 può essere quindi presa come riferimento.

In relazione ai nuovi risultati relativi alle prove di fatica a taglio, tutte effettuate con un rapporto nominale di ciclo $R \approx 0$, il valore medio sperimentale è risultato pari a $\Delta\tau = 100$ MPa, che si riduce a $\Delta\tau = 84$ MPa considerando una probabilità di sopravvivenza del 90%. L'indice di dispersione è risultato pari a 1.43, leggermente inferiore a quello che caratterizza la banda di Haibach (1.50). Alla luce di queste considerazioni è lecito pensare che il valore di riferimento relativo a una probabilità di sopravvivenza del 97.7% si assesti intorno ai 75 MPa. La pendenza delle curva di resistenza a fatica è risultata pari a 6,5, non molto diversa da quella suggerita dall'EC3, $k=5.0$, per il materiale base non intagliato soggetto a taglio. In relazione alle modalità di rottura, queste sono risultate variabili in funzione dell'entità del carico esterno applicato. Le rotture si sono infatti manifestate sistematicamente sulle barre filettate ad alto carico (basso numero di cicli), sul calcestruzzo a basso carico (alto numero di cicli). In quest'ultima condizione, comunque, il cedimento del calcestruzzo si accompagnava a fessurazioni evidenti sulle barre.

All threaded rods with a nominal diameter equal to 30 mm and subject to superficial zinc-coating proved a fatigue strength lower than the above-mentioned samples' one, with reference to the explored fatigue life regime, $N < 2 \times 10^5$ cycles. For the M30 bars the tensile reference curve supplied by the EC3 can be therefore taken as a reference.

With regards to the new results concerning the shear fatigue tests, all performed with a nominal load ratio of $R \approx 0$, the average experimental value was equal to $\Delta\tau = 100$ MPa, which decreases to $\Delta\tau = 84$ MPa taking into account a survival probability of 90%. The scatter index was equal to 1.43, slightly lower than the one that characterises the Haibach band (1.50). In the light of these considerations, it is fair to think that the reference value related to a survival probability of 97.7% settles around 75 MPa. The slope of the fatigue strength curve was equal to 6.5, very similar to the one suggested by the EC3, $k=5.0$, for un-notched base material subject to shear stresses. With reference to the failure modes, these were variable according to the size of the external load applied. Ruptures in fact occurred systematically on the threaded rods with high load (low number of cycles), on concrete with low load (high number of cycles). In the latter condition, however, the subsidence of the concrete was contemporary to evident cracking on the rods.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] J. KUNZ, (2003) "Chemical fastenings for fatigue loads", in: Joining Techniques in the Building Construction Industry. Internat. Klebetechnik-Symposium, München, 2003.
- [2] K. BLOCK, F. DREIER, (2003), "Das Ermüdungsverhalten von Dübelbefestigungen", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 541, 55-59.
- [3] L. EVANGELISTA, A. VITTOZZI, G. SILVESTRI, (2009), "Valutazione teorico-sperimentale del comportamento delle barriere antirumore su linee ad alta velocità", Ingegneria Ferroviaria, Gennaio 2009.
- [4] P. LAZZARIN, J. GRÜN, F. MUTIGNANI, R. RONCHI, (2010), "Fatigue behaviour of bonded anchors subjected to tensile loads", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 41, 372-377.
- [5] "Fischer Technical Handbook", (2006), Fischer Ed., Waldachtal.
- [6] ETAG, linee guida emesse dalla EOTA – European Organisation for Technical Approval.
- [7] Eurocode 3 (2005), EN 1993-1-9.
- [8] K. BLOCK, F. DREIER, (2002), "Untersuchungen zur Eignung des Injektionsankers fischer FHB dynamic in den Größen 100 M12, 125 M16, 170 M20 und 220 M24 galvanisch verzinkt bei ermüdungsrelevanten Einwirkungen", Report N. 02.02.50, December 2002.
- [9] K. BLOCK, F. DREIER, (1998), "Untersuchungen zur Eignung des Upat multicone Verbundankers UMV aus galvanisch verzinktem Stahl bei ermüdungsrelevanten Einwirkungen", Report Nr. 98.02.01, September 1998.
- [10] G.H. MAJZOBI, G.H. FARRAHI, N. HABIBI, (2005), "Experimental evaluation of the effect of thread pitch on fatigue life of bolts", International Journal of Fatigue 27, 189-196.

- [11] P.L. WELLS, (1997), "Fatigue tests on steel bolts", Offshore Technology Report – OTO 97 067.
- [12] Y. FARES, M. CHAUSSUMIER, A. DAIDIE, J. GUILLLOT, (2006), "Determining the life cycle of bolts using a local approach and the Dang Van criterion", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 29, 588-596.
- [13] P. LIVIERI, P. LAZZARIN, (2005), "Fatigue strength of steel and aluminium welded joints based on generalised stress intensity factors and local strain energy values", International Journal of Fracture, 133, 247-278.
- [14] P. LAZZARIN, F. BERTO, F.J. GOMEZ, M. ZAPPALORTO, (2008), "Some advantages derived from the use of the strain energy density over a control volume in fatigue strength assessments of welded joints", International Journal of Fatigue, 30, 1345-1357.



Tecnologie e soluzioni per l'armamento ferroviario

- Saldatura alluminotermica rotaie
- Attraversamenti stradali Strail® e pedonali Pedestrail®
- Sistemi a rulli per scambi
- Impianti snevamento telecomandati
- Impermeabilizzazioni sottopassi e gallerie
- Consolidamento massicciate - TBB
- Ingrassatore ecologico



THERMIT® ITALIANA S.r.l.

A Member of the Goldschmidt-Thermit Group

Via Sirtori, 11 • 20017 Rho (MI) • Tel. 02 93.18.09.32 • Fax 02 93.50.12.12 • www.thermit.it