



**Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per l'Energetica e le Interfasi
Milano**

***Materiali Strutturali per l'Energia
Attività e Competenze***

Giuliano Angella, Ph.D.

IENI-CNR

Via R. Cozzi 53, 20125 Milano

E-mail: angella@ieni.cnr.it

Tel. 02 66173 327

29/02/2016

Struttura e gruppo di ricerca

Area3 Bicocca - Milano



IENI-CNR
Via R. Cozzi 53, 20125
Milano

Ricercatori

Maurizio Maldini

Giuliano Angella

Dario Ripamonti

Riccardo Donnini (TD)

Collaboratori tecnici

Tullio Ranucci

Davide Della Torre

Commessa: *Materiali e Processi per l'Energetica*

- **Modulo:** *Materiali strutturali innovativi per l'energetica*



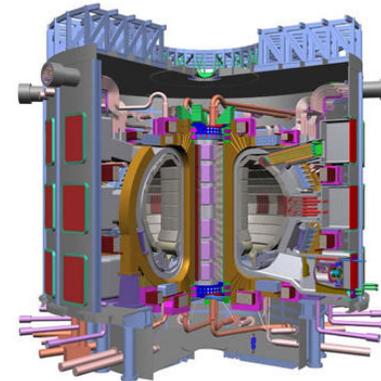
Tematiche

Materiali e processi per l'energia

Materiali metallici strutturali in impianti per produzione di energia ed applicazioni aeronautiche



Materiali per la fusione termonucleare



ITER

Ricerca di supporto all'industria manifatturiera

Metallurgia avanzata



Materiali e componenti biomedicali



Attività di ricerca

- Caratterizzazione meccanica di materiali per applicazioni ad alte temperature
- Analisi dei meccanismi di danno e di deformazione nelle leghe sollecitate ad alte temperature
- Sviluppo di equazioni costitutive funzionali per il comportamento di leghe metalliche
- Caratterizzazioni micro-strutturali avanzate di supporto alle equazioni costitutive
- Verifiche a resistenza e tenuta dei componenti
- Supporto allo sviluppo di nuove leghe



Materiali studiati

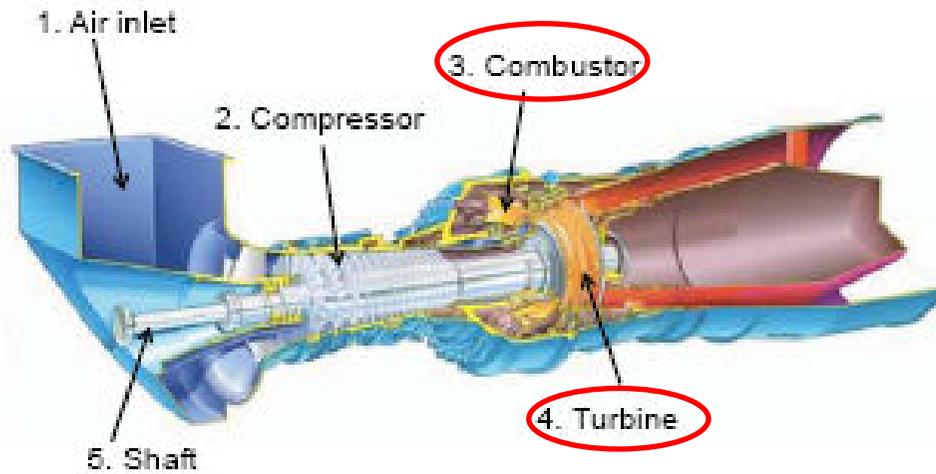
- Superleghe di nichel policristalline, solidificate direzionalmente, cristalli singoli, ODS, acciai inossidabili ed alto legati per applicazioni ad elevate temperature, intermetallici
- Materiali strutturali per reattori a fusione termonucleare (ITER, FTU)
- Ghise sferoidali ed austemperate per componenti meccaniche nel settore trasporti
- Rame e nichel di purezza commerciale per formulazione di modelli plastici a parametri fisici
- Analisi meccanica di arti protesici e relativi componenti



Applicazioni aeronautiche



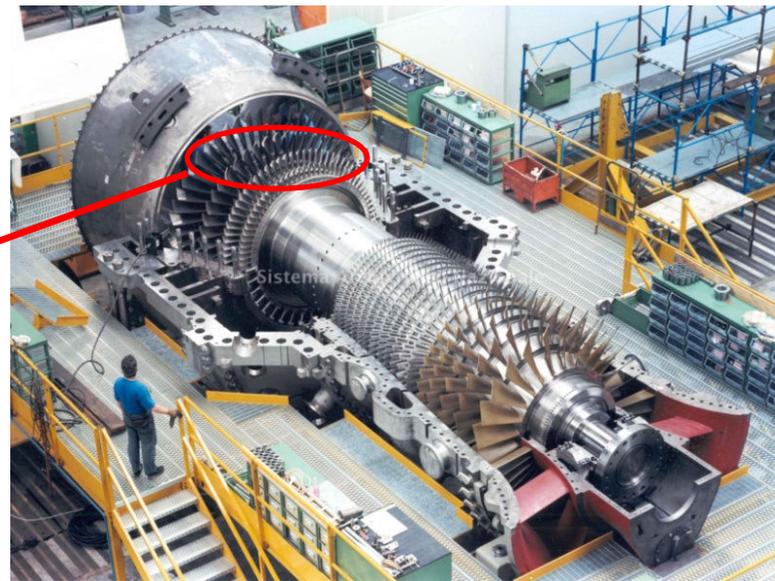
Produzione di energia



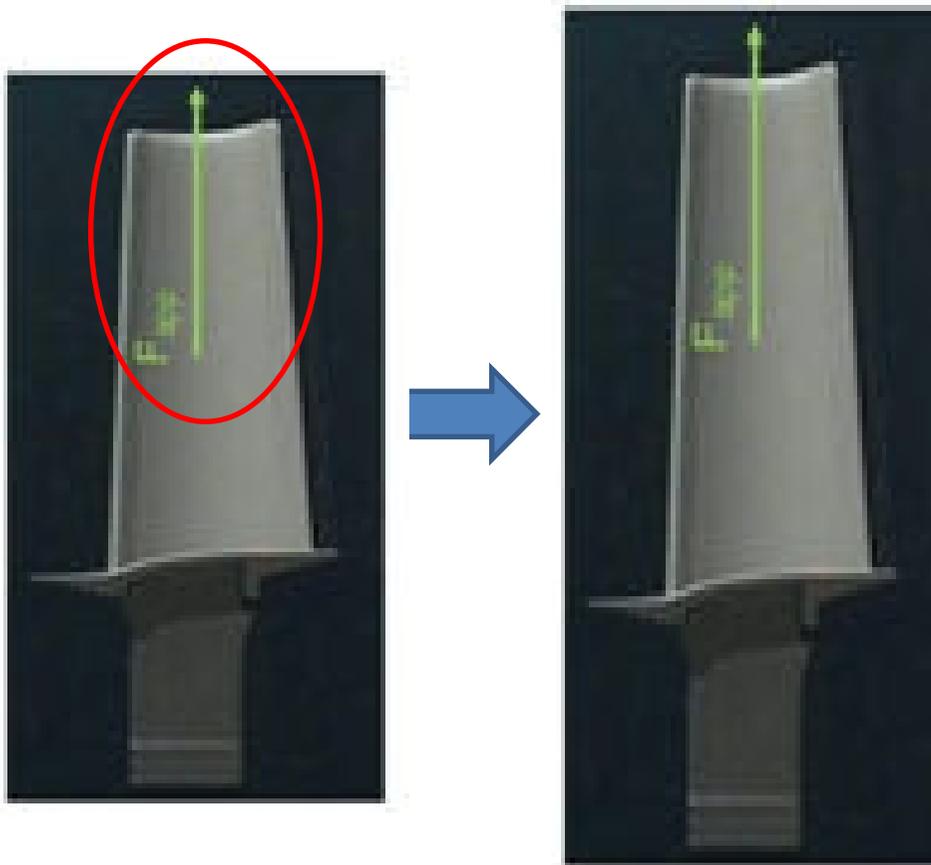
Componenti:

- palette
- dischi
- camera di combustione
- parti di transizione
- elementi di tenuta

$500^{\circ}\text{C} < T < 1100^{\circ}\text{C}$



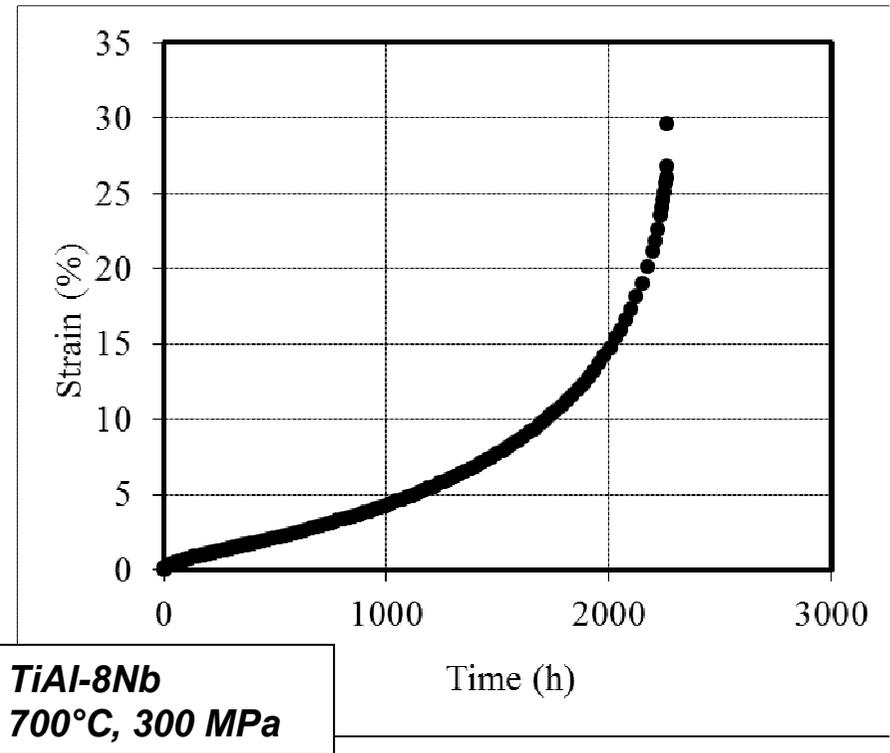
Produzione di energia ed applicazioni aeronautiche



La paletta è sollecitata da elevate forze centrifughe (tipicamente 100000 g)

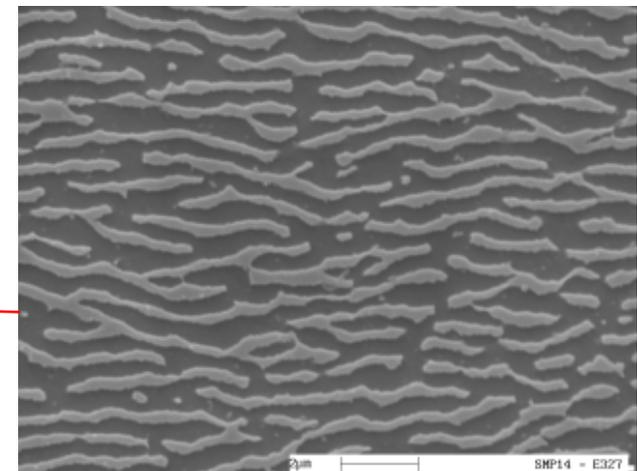
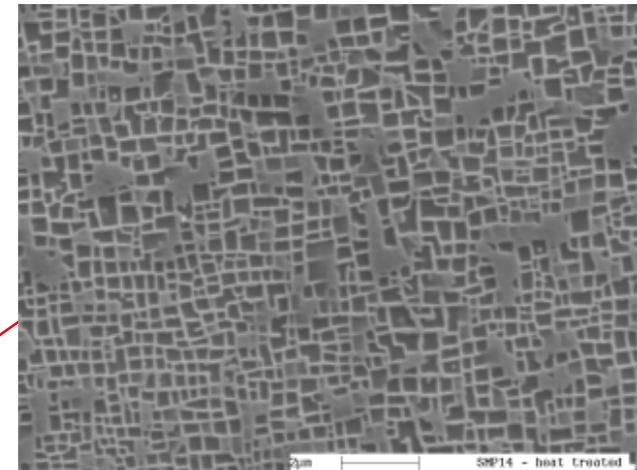
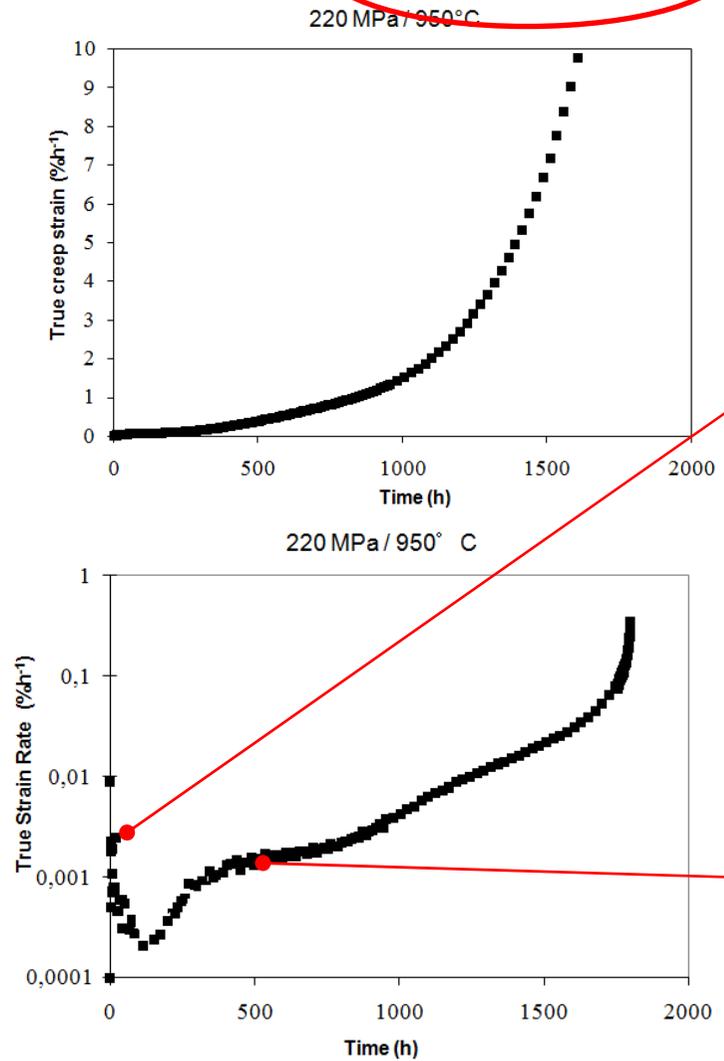
Il fenomeno del CREEP

Deformazione dipendente dal tempo che avviene ad elevate temperature con carichi inferiori allo snervamento.



Comportamento meccanico e **microstrutturale** in regime di CREEP

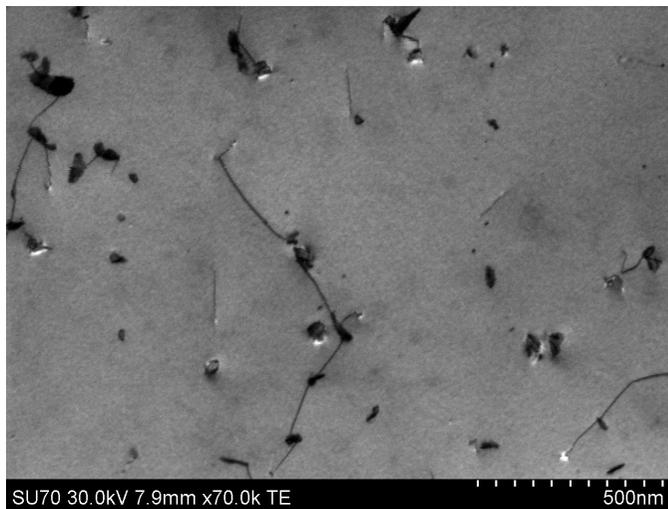
**SMP14 - Superlega SX
di nichel per palette di
turbina a gas**



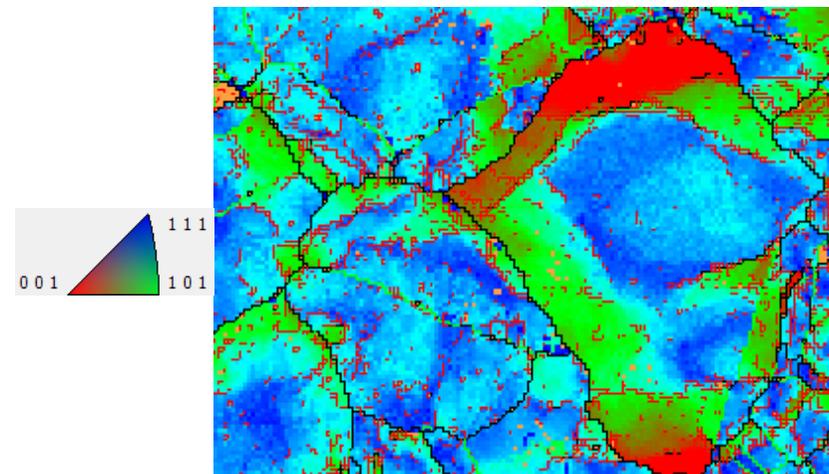
Tecniche di caratterizzazione microstrutturale avanzata

EBSD – Stato di deformazione

HR SEM SU70 Hitachi + EDS
+ STEM + EBSD



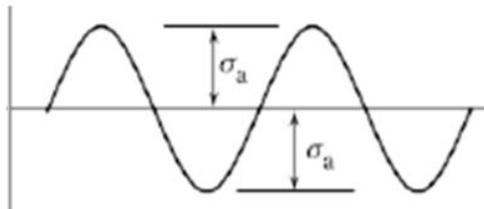
Osservazioni in trasmissione
AISI 441



— 25 μ m 0-9°

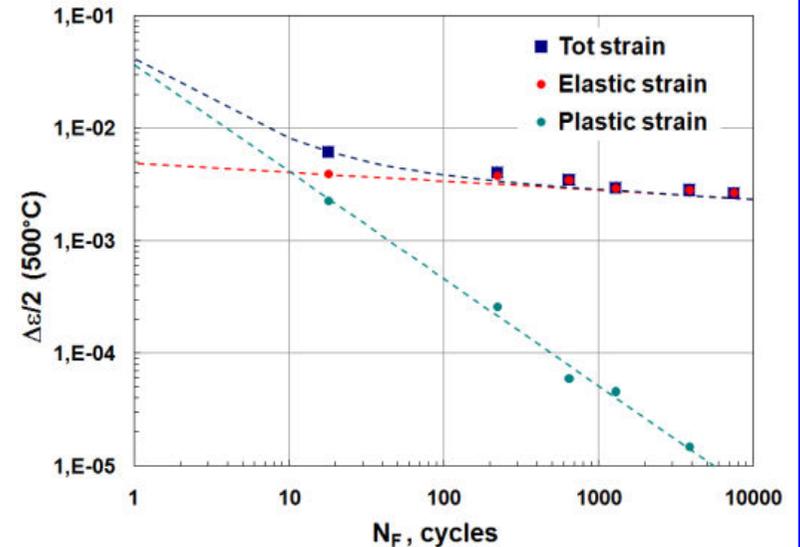
AISI 304L deformato
a 1100°C, 0.01 s⁻¹

Fatica meccanica



Decadimento della resistenza dei materiali per effetto di carichi variabili nel tempo

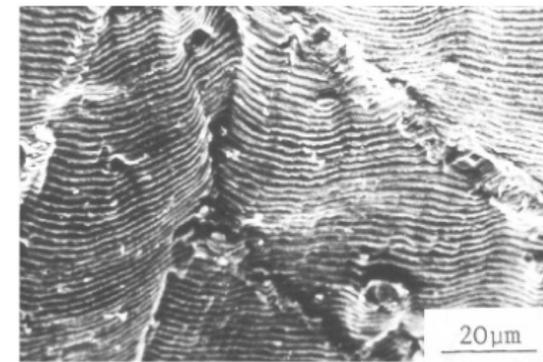
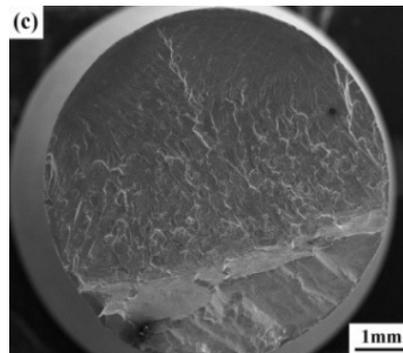
Acciaio strutturale per settore energetico



Comportamento meccanico, micro-strutturale e modellazione

Superleghe di nichel per settore aeronautico

Superleghe per settore piping



I cicli di accensione e spegnimento

sono deleteri per i materiali
dei componenti meccanici più caldi

Fatica termo-meccanica

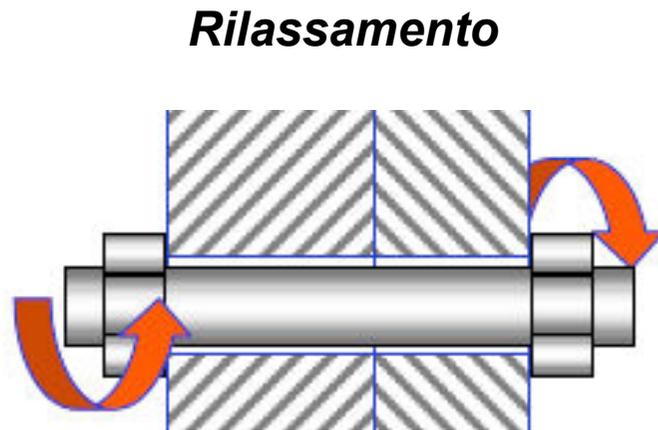
Le turbine a gas sono **strategiche**
in combinazione con impianti di produzione di
potenza da **fonti rinnovabili**, quali quella eolica
o solare, per loro natura discontinue.

PERO'

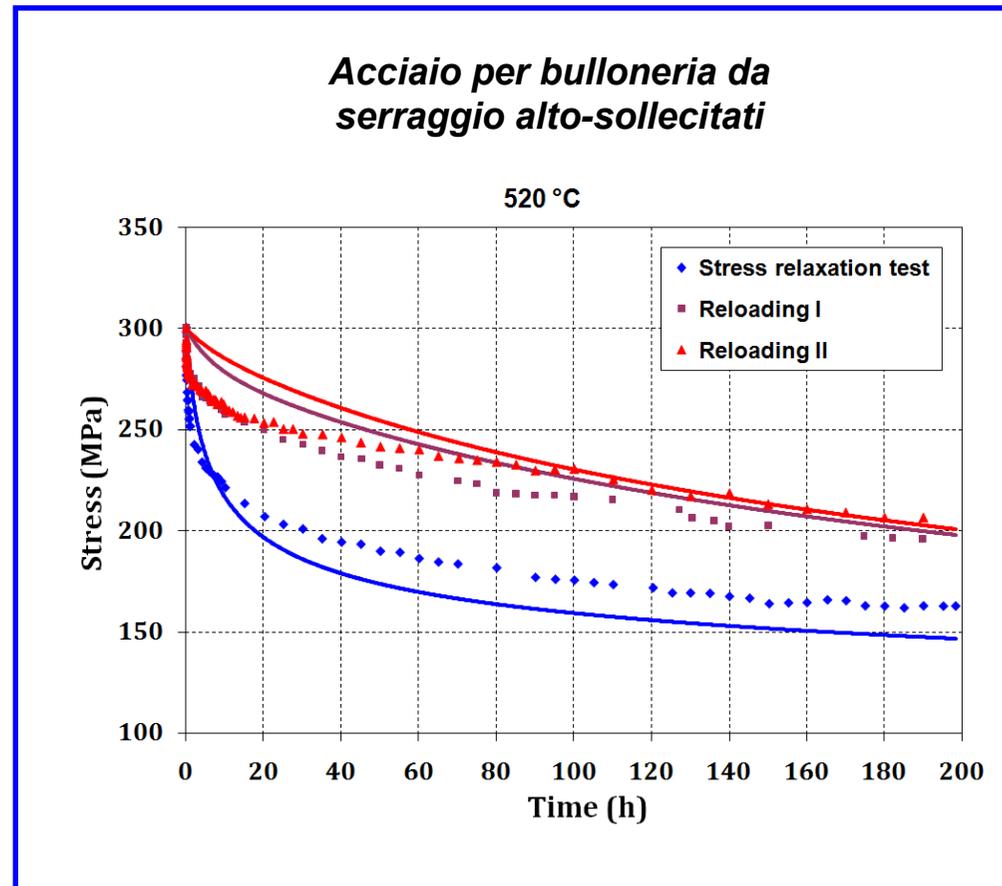
Aumento del numero di cicli
(spesso due al giorno) rende ancora
più critico l'utilizzo delle turbine

***Lo studio e la modellazione della Fatica
Termo-meccanica è fondamentale!***

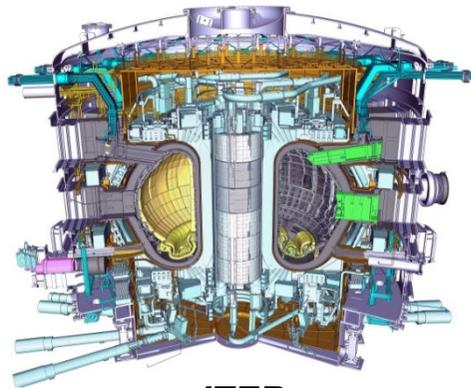




Decadimento della resistenza del materiale nel tempo ad elevate temperature.

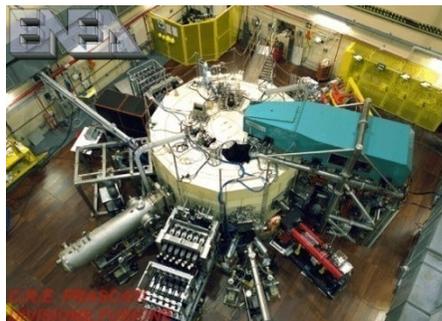


Caratterizzazione di materiali per reattori a fusione termonucleare (ITER, FTU)



ITER

*International Thermonuclear
Experimental Reactor*

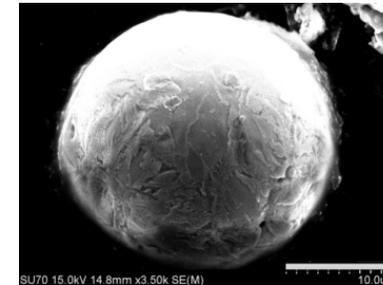


FTU

Frascati Tokamak Upgrade

- popolamento di *Material Database* per la caratterizzazione meccanica (**CREEP**, **FATICA MECCANICA** e **TERMO-MECCANICA**) degli acciai strutturali standardizzati (Eurofer 97/1 e /2);
- qualificazione dei materiali in fase di standardizzazione quali le leghe CuCrZr;
- validazione degli strumenti di valutazione e modellazione del comportamento dei materiali in condizioni operative;
- caratterizzazione micrografica di depositi in W a simulare la deposizione di impurità da plasma in ITER.

- caratterizzazione e comportamento di polveri metalliche in reattori a fusione FTU
- caratterizzazione di rivestimenti assorbitori di onde millimetriche depositati con plasma spray



Struttura dendritica di polveri a base Ni raccolte in FTU



Formulazione di equazioni costitutive

CREEP, FATICA MECCANICA e TERMO-MECCANICA

Le equazioni costitutive sono modelli matematici che descrivono il comportamento dei materiali, correlando parametri di esercizio, tipicamente:

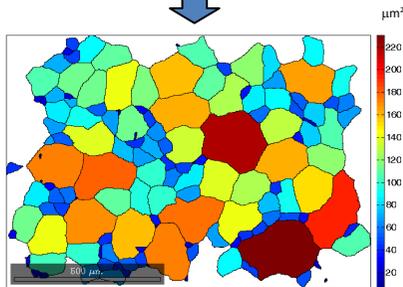
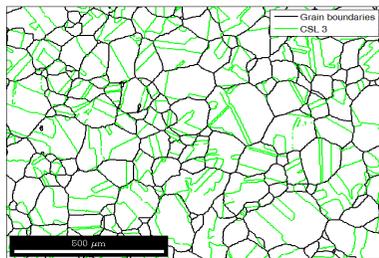
- 1. Temperatura;***
- 2. Sforzo applicato;***
- 3. Deformazione e tempo.***

Le equazioni costitutive servono per:

- 1. Pianificare le condizioni di esercizio di un componente meccanico;***
- 2. Pianificare interventi di manutenzione del componente;***
- 3. Predire il tempo di vita del componente in esercizio;***
- 4. Pianificare la sostituzione dei componenti eserciti e, dunque, predire il tempo di vita del componente esercito.***



Ricerca di supporto all'industria manifatturiera: laminazione a caldo

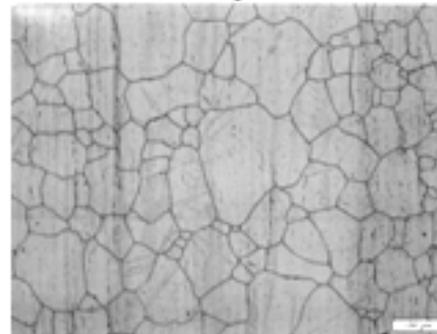


EBSD - Evoluzione del grano

Comportamento plastico di
AISI 304L ad elevate
temperature

Ricristallizzazione dinamica;
Statica;
Meta-dinamica.

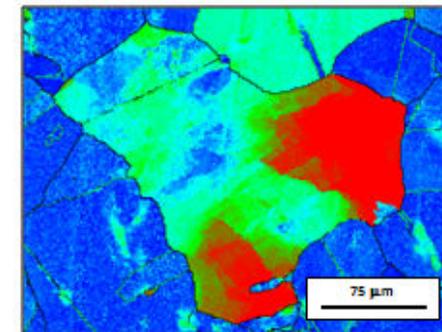
σ



σ

Compressione a
1100°C, 10⁻¹ s⁻¹

Struttura di
deformazione

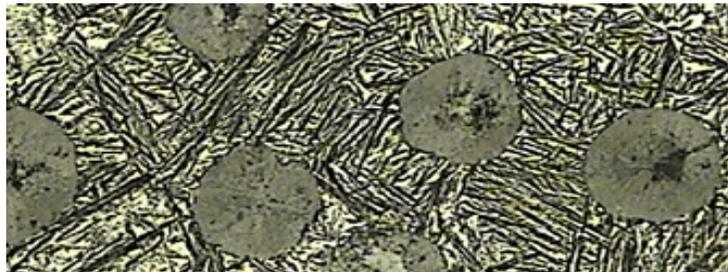


0° - 6°

EBSD - Strain map

Ricerca di supporto all'industria manifatturiera: produzione di ghise innovative

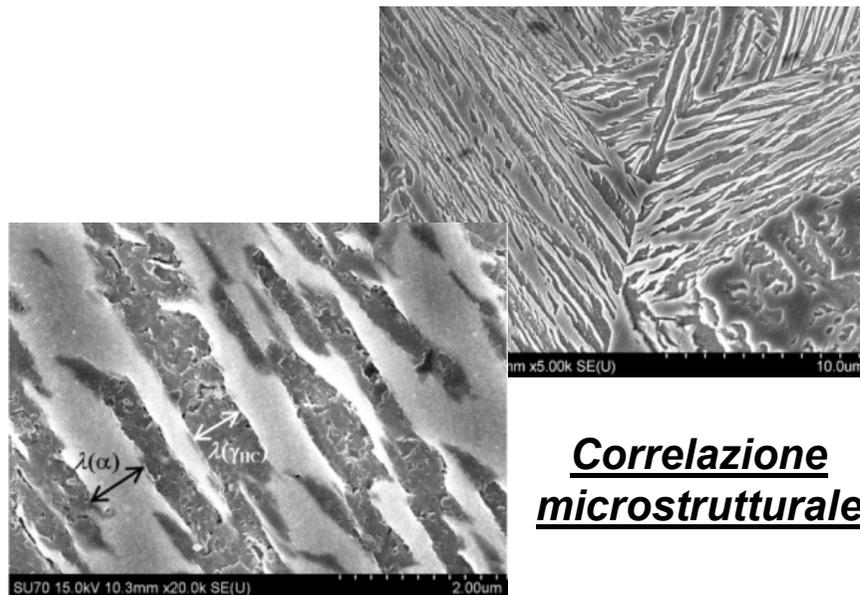
Ghise austemperate per settore trasporti



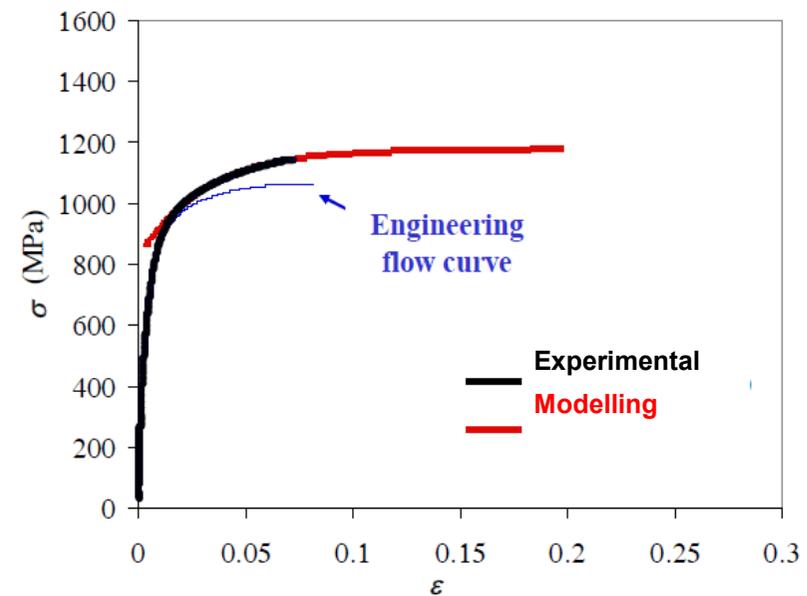
Equazioni costitutive con parametri fisici

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = M \cdot \left[\left(\frac{1}{b\Lambda} + \frac{1}{bD} + \frac{1}{b\lambda} \right) - r \cdot \rho \right]$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \varepsilon_c^{-1} \cdot \sigma_v - \varepsilon_c^{-1} \cdot \sigma$$



**Correlazione
microstrutturale**



Analisi del comportamento plastico

***Ricerca di supporto all'industria manifatturiera:
componenti e materiali per la protesica***



**Configurazione
di prova per
protesi di
ginocchio**

- **Analisi meccanica di materiali e componenti**
- **Verifica degli standard normativi**



- **Prove di fatica fino a 3.000.000 di cicli**
- **Prove di trazione ad alti livelli di sforzo**

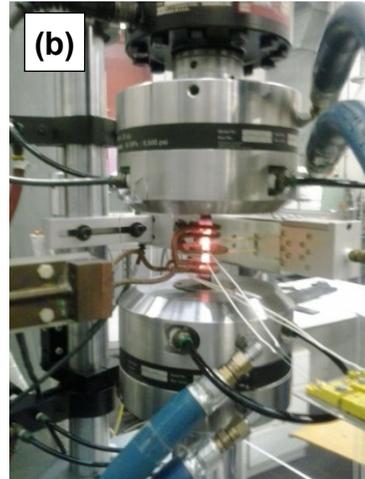
Laboratori e strumentazione

Laboratori di Caratterizzazione meccanica

(a) 15 macchine per prove di creep per temperature fino a 1150°C

(b) 3 macchine di prova elettroidrauliche fino a 200 kN per prove meccaniche (fatica, fatica termo-meccanica, propagazione di cricca) fino a 1200°C + 2 macchine per fatica rotante

(c) 3 macchine di prova elettromeccaniche per prove meccaniche (trazione e rilassamento) fino a 50 kN e 1200°C



Laboratori di Microscopia e Diffrazione

(d) SEM ad alta risoluzione SU70 Hitachi con STEM detector per osservare i campioni in trasmissione, sistema EBSD e EDS.

(e) Diffratometro X SIEMENS D500



Progetti e contratti

- EC 6th FP IP *IMPRESS* – NMP3 (2004-09) “*Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification*”, creep, LCF, crack propagation and microstructure studies of TiAlNb compound and a new TiAlTa intermetallic compound for light aeronautic gas turbine blades (co-ordinated by ESA), >40 partners: Rolls-Royce Derby, ACCESS Aachen, IMSAS .
- ANSALDO ENERGIA contract (2005-09): *PANDA* – Creep, TMF and LCF studies of Renè-80 Ni-base superalloy for Industrial Gas Turbine Blade in collaboration with CSM SpA.
- EMA SpA(FAR) + FIRB *MITGEA* contracts (2007-09) on Creep behaviour and modelling of CMSX486 SX and a new Intermetallic Compound (CNR, EMA, CSM, ANSALDO ENERGIA, ANSALDO RICERCHE, ENEA, Università di Genova)
- AVIO SpA contract (2005-08): tensile, creep, LCF and microstructure studies of Haynes 230 Ni-base superalloy for combustion chamber of AVIO-SNECMA engine to be used for Suhoi regional aircraft, in collaboration with CSM SpA.
- ANSALDO ENERGIA contract (2010-12): creep behaviour of an alloy for turbine disks.
- MANGIAROTTI NUCLEARE contract (2010-12): evaluation of residual stress on 690TT pipes by X ray.
- ANSALDO ENRGIA contract (2014): stress relaxation characterization of steel X19
- TENARIS DALMINE SpA contract (2014-2015): EBSD characterization of AISI 304L for SRX and P-DRX study
- ANSALDO ENERGIA contract (2014-2015): LCF characterization of Alloy 247LC
- EUROfusion: WPMAT, Task EDDI (2014-2017)



Pubblicazioni

- **G. Angella**, F. Zanardi, **R. Donnini**, “On the significance to use dislocation density-related constitutive equations to correlate strain hardening with microstructure of metallic alloys: The case of conventional and austempered ductile irons”, *Journal of Alloys and Compounds*, 669 (2016), pp. 262-271.
- A. Paggi, **G. Angella**, **R. Donnini**, “Strain induced grain boundary migration effects on grain growth of an austenitic stainless steel during static and metadynamic recrystallization”, *Materials Characterization* 107 (2015), pp.174-181.
- M. De Angeli, L. Laguardia, G. Maddaluno, E. Perelli Cippo, **D. Ripamonti**, et al., “Investigation on FTU dust and on the origin of ferromagnetic and lithiated grains”, *Nuclear Fusion* 55 (2015), pp. 1-9.
- E. Vassallo, R. Caniello, **G. Angella**, D. Dellasega, G. Granucci, et al., “Retention of nanocrystalline WN_x layers exposed to high-fluence deuterium plasmas”, *Journal of Nuclear Materials* 466 (2015), pp. 621-626.
- M. De Angeli, I. Bykov, K. Bystrov, S. Bardin, F. Brochard, **D. Ripamonti**, et al., “Elastic–plastic adhesive impacts of tungsten dust with metal surfaces in plasma environments”, *Journal of Nuclear Materials*, 463 (2015), pp. 877-880.
- M. De Angeli, G. Maddaluno, L. Laguardia, **D. Ripamonti**, E. Perelli Cippo, M.L. Apicella, et al., “Dust characterization in FTU tokamak”, *Journal of Nuclear Materials*, 463 (2015), pp. 847-850.
- **G. Angella**, **R. Donnini**, **D. Ripamonti**, **M. Maldini**, “Combination between Voce formalism and improved Kocks-Mecking approach to model small strains of flow curves at high temperatures”, *Materials Science & Engineering A* 594 (2014) pp.381-388.
- A. Castellero, D. Lussana, **D. Ripamonti**, **G. Angella**, M. Baricco, “Cold rolling of amorphous/crystalline Ag_{73.2}Cu_{17.1}Zr_{9.7} composite”, *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014), pp.S79–S8.
- Lussana, A. Castellero, M. Vedani, **D. Ripamonti**, **G. Angella** , “Microstructure refinement and hardening of Ag–20 wt.%Cu alloy by rapid solidification”, *Journal of Alloys and Compounds* 615 (2014) S633-S637.
- A. Castellero, **G. Angella**, M. Vedani, M. Baricco, “Rapid solidification of silver-rich Ag–Cu–Zr–Al alloys”, *Journal of Alloys and Compounds* , 586 (2014) pp.S111–S116.



Convegni internazionali

- **G. Angella, R. Donnini**, “Investigation on the effect of thermal activation of plastic flow on strain hardening analysis”, *17th International Conference on the Strength of Materials, Brno (CZ), 2015*
- A. Riva, **M. Maldini**, “Stress relaxation modelling”, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, Montreal (CA), 2015*
- **G. Angella, R. Donnini**, A. Paggi, “EBSD analysis of the microstructure during static and metadynamic recrystallisation of austenitic stainless steel”, *EBSD 2015 Meeting at University of Strathclyde, Glasgow (GB), 2015*
- **G. Angella, R. Donnini**, J.S.Hou, **M. Maldini, D. Ripamonti, T. Ranucci**, L. Zhou, “Evaluation of high temperature behaviour of a new low density nickel base superalloy for aeronautical gas turbine blade applications”, *10th Conference on Materials for Advanced Power Engineering (Eds: J. Lecomte-Beckers, O. Dedry, J. Oakey, B. Kuhn), Liege (BE), 2014, pp.500-509.*
- **G. Angella, D. Della Torre, R. Donnini, M. Maldini, D. Ripamonti**, F. Pero, E. Poggio, A. Riva, A. Sanguineti, “Stress relaxation modeling using creep data”, *10th Conference on Materials for Advanced Power Engineering (Eds: J. Lecomte-Beckers, O. Dedry, J. Oakey, B. Kuhn), Liege (BE), 2014, pp.121-130*
- **G. Angella, R. Donnini, D. Ripamonti, M. Maldini**, “The role of particle ripening on the creep acceleration of Nimonic 263 superalloy”, *Eurosuperalloys 2014 Conference /Giens (FRA), MATEC Web of Conferences 14-14001 (2014), pp.1-6.*
- **G. Angella, R. Donnini**, V. Lupinc, **M. Maldini, D. Ripamonti**, “Creep curve behaviour of TiAl-8Ta intermetallic alloy”, *3rd International Creep & Fracture Conference ECCO, Roma, 2014*
- R. Caniello , E. Vassallo, **G. Angella** , D. Dellasega, *et al.*, “Deuterium retention in tungsten nitride specimens exposed to high fluence deuterium plasma”, *21st International Conference on Plasma Surface Interactions, Kanazawa (JPN), 2014.*



Attività didattica e di formazione

- *Abilitazione scientifica per Professore di II fascia* nel bando 2012 (DD n. 222/2012) per il Settore Concorsuale 09/A3, Metallurgia, ING-IND/21 - **G. Angella**
- Docente dal 2012 di *Lezioni teoriche sul Microscopio Elettronico a Trasmissione (TEM) e pratiche sui principali metodi di creazione dell'immagine al microscopio*, Corso di Dottorato in Ingegneria dei Materiali, Politecnico di Milano - **G. Angella**
- Docente AA 2013-2014, AA 2014-2015 e AA 2015-2016 del corso *Scienza dei Metalli di Scienze dei Materiali* della Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell' Università Milano-Bicocca - **G. Angella**
- Docente dal 2008 al 2013 del corso *Fisica dei Metalli e Laboratorio di Fisica dei Metalli* di Scienze e Tecnologie Orafe della Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell' Università Milano-Bicocca - **G. Angella**
- Docente AA 2011-2012 e AA 2012-2013 del corso *Fisica dei Metalli e Laboratorio di Fisica dei Metalli* di Scienze e Tecnologie Orafe della Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell' Università Milano-Bicocca - **D. Ripamonti**
- Esercitatore AA 2013-2014 del corso *Metallurgia e materiali non metallici* di Ingegneria Meccanica, Politecnico di Milano - **D. Ripamonti**
- Correlatore AA 2011-2012 per la tesi di Laurea in Scienze e Tecnologie Orafe, Facoltà di Scienze MM, FF e NN, Università Milano-Bicocca: "Caratterizzazione microstrutturale di Ag affinato mediante tecnica Constrained Groove Pressing" - **G. Angella**
- Correlatore AA 2011-2012 tesi di Laurea in Scienze e Tecnologie Orafe, Facoltà di Scienze MM, FF e NN, Università Milano-Bicocca: "Scansione e Diffrattometria con i raggi X" - **G. Angella**
- Correlatore AA 2006-2007 tesi di Laurea in *Ingegneria dei Materiali*, Politecnico di Milano: "Sviluppo di una lega ultrafine Al-Mg-Si mediante laminazione asimmetrica" – **G. Angella**
- Correlatore AA 2007-2008 tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica di secondo livello, Politecnico di Milano: "Caratterizzazione meccanica e microstrutturale della superlega base nichel H230 per utilizzo aeronautico" – **G. Angella**



Attività divulgativa

Associazione Italiana di Metallurgia (AIM)

G. Angella (Presidente), **R. Donnini**: membri del Centro di studio *Metallurgia Fisica e Scienza dei materiali (MFSM)*

M. Maldini, **D. Ripamonti**: membri del Centro di studio *Materiali per l'Energia (ME)*;

R. Donnini: membro del Centro di studio *Trattamenti Termici e Metallografia (TTM)*.



Recenti iniziative organizzate:

- Corso *Creep*, **D. Ripamonti**, **M. Maldini**
- Giornata di Studio *Tecniche Sperimentali per la Caratterizzazione dei materiali*, **G. Angella**
- Corso *Tenacità e fatica dei materiali metallici*, **R. Donnini**
- Corso *Microscopia Elettronica in Trasmissione (TEM)*, **G. Angella**

Recenti interventi:

- **R. Donnini**, *Metallografia e trattamento termico delle superleghe di nichel*, Giornata di Studio AIM sui Materiali per Oil&Gas in superleghe e acciai inossidabili”
- **G. Angella**, *Microscopia elettronica avanzata per metallurgisti*, Giornata di Studio AIM *Tecniche di Laboratorio per la caratterizzazione de materiali*
- **D. Ripamonti**, *Creep delle superleghe*, Corso di Creep AIM
- **R. Donnini**, *Metallografia delle superleghe, tipi di superleghe, trattamenti termici e interpretazione delle microstrutture*, Corso AIM "Metallografia”
- **G. Angella**, *Microscopia Elettronica e Tecniche Microanalitiche*, Giornata di Studio AIM *Tecniche di Laboratorio per la caratterizzazione de materiali*, Corso AIM "Metallografia”

