

Nel corso del 2005, nell'ambito della scelta strategica europea sulla Politica integrata di prodotto (IPP) come strumento decisivo per promuovere un mercato di prodotti a minor impatto ambientale, sono stati ulteriormente sviluppati i risultati ottenuti negli anni precedenti nel campo dei sistemi volontari di Life Cycle Assessment (LCA) di prodotto e di filiera, attraverso nuovi progetti finanziati in ambito europeo, nazionale e regionale.

In particolare, sono state svolte attività di valutazione dell'impatto ambientale e degli aspetti tecnico-economici di soluzioni tecnologiche innovative in sostituzione delle batterie di accumulatori al piombo come sistemi di alimentazione di back up di centrali telefoniche e attività di disseminazione e applicazione di strumenti e studi di LCA per l'eco-innovazione applicate al distretto marchigiano del legno arredo di filiera (mobili da cucina, da ufficio e cappe) al fine di identificare i principali impatti ambientali.

Nell'ambito di un progetto finanziato dalla Regione Emilia-Romagna, inoltre, l'ENEA ha avviato la costituzione di un laboratorio di LCA ed ecodesign, ha realizzato uno studio preliminare di LCA di diversi scenari di gestione integrata dei rifiuti della Provincia di Bologna e avviato gli studi di LCA relativi alle tecnologie innovative quali l'inertizzazione e recupero di scorie e ceneri volanti da inceneritori di RSU, il recupero di fanghi da levigatura di gres porcellanato, la piattaforma integrata di riciclo della carta stampata con inchiostri ecologici, il riciclaggio di polipropilene.

#### 6.9. *Tutela degli ecosistemi*

**Biodiversità.** Nel corso del 2005, sono state completate le indagini relative alla vegetazione infestante lungo i tracciati ferroviari, sono stati individuati, isolati e prodotti per via fermentativa i principi attivi di origine naturale e sono stati condotti i primi esperimenti in laboratorio e in campo controllato sull'efficacia dei principi attivi individuati. Tale attività ha lo scopo di mettere a punto la composizione e il processo produttivo di un formulato a base di sostanze naturali per il controllo della vegetazione infestante, da utilizzare in aree ad uso civile ed industriale. Questo prodotto permetterà di sostituire i preparati di sintesi attualmente utilizzati, diminuendo l'impatto sull'ambiente e migliorando le pratiche di gestione del territorio. Si è proceduto, inoltre, alla individuazione e descrizione dei caratteri peculiari delle aree protette gestite dall'Università di Catania, nell'ambito di un progetto per la messa a punto di un sistema a basso impatto antropico ed ambientale per il rilevamento, la trasmissione e la successiva gestione di dati inerenti aree protette di difficile accesso.

**Desertificazione.** È stato messo a punto un approccio metodologico innovativo per giungere ad un aggiornamento sullo stato della desertificazione in Italia, evidenziando le dinamiche dei processi di degrado delle risorse naturali in corso. La metodologia prende spunto da "hot spot" rappresentativi, individuati sul territorio nazionale e attualmente oggetto di studio, in grado di evidenziare le tendenze del fenomeno, e rileva le relazioni tra desertificazione, agricoltura, irrigazione e ambiente. Per queste aree, viene così ottenuta un'analisi degli impatti prodotti e subiti dall'agricoltura ed una valutazione sull'adozione di possibili sistemi di allerta precoce. A questo percorso è associata la messa a punto di un sistema di monitoraggio multitemporale di parametri agro-ambientali significativi, attraverso la combinazione di tecniche di telerilevamento satellitare, fotointerpretazione e rilievi a terra. Sono state quindi individuate azioni di prevenzione, mitigazione ed adattamento sul territorio, mediante l'utilizzo di un sistema in grado di valutarne la compatibilità ambientale ed economica. L'analisi degli aspetti economici legati alla desertificazione è argomento estremamente controverso e l'ipotesi di lavoro avviata mira a collegare le applicazioni delle nuove politiche di gestione delle risorse

naturali (in particolare acqua e suolo) agli strumenti tradizionali di misura della ricchezza economica. Si va infine consolidando il collegamento con imprese high-tech ed amministrazioni locali per la gestione di iniziative congiunte e per lo sviluppo di progetti di creazione d'impresa.

#### **6.10. Il sistema dei trasporti: sicurezza e compatibilità ambientale**

Gli interventi in questo campo riguardano lo sviluppo di tecnologie per la gestione e il controllo della mobilità e del traffico finalizzate all'aumento dell'efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale e la sperimentazione di nuovi sistemi di trazione per autoveicoli innovativi, principalmente veicoli ibridi. Le principali attività sviluppate sono state: lo sviluppo di sistemi per le predizioni del traffico veicolare e per la gestione e il monitoraggio del traffico merci in ambito urbano e la realizzazione di un innovativo sistema di accumulo elettrico per autoveicoli.

##### **Sistema telematico per la gestione del flusso informativo e il monitoraggio del processo di consegna delle merci in ambito urbano (Telelogistics)**

La distribuzione/raccolta delle merci all'interno dei centri urbani costituisce una delle principali cause del problema della congestione del traffico (nelle aree metropolitane 10-20% del traffico totale) e contribuisce in modo consistente all'inquinamento ambientale specialmente per quanto riguarda le emissioni di particolato. Mentre la riduzione del contributo all'inquinamento ambientale può essere ottenuta migliorando le caratteristiche del parco veicoli in circolazione e con l'introduzione di nuovi veicoli (metano) per la riduzione del traffico e della congestione è indispensabile riorganizzare ed ottimizzare l'attuale sistema distributivo.

Schemi innovativi prevedono l'utilizzo di piattaforme logistiche dove la merce destinata ai punti vendita viene recapitata e consolidata per destinazione e quindi trasportata a destinazione finale da veicoli a basso o nullo impatto ambientale.

La gestione dell'intero processo di ritiro, consegna delle merci, la pianificazione del servizio, l'ottimizzazione della catena di distribuzione devono essere realizzati mediante una piattaforma tecnologica informatica gestita dal centro operativo della base logistica

In questo ambito, è stato sviluppato un sistema telematico finalizzato alla gestione ed al controllo del flusso di informazioni della catena logistica urbana (luoghi di origine della merce, piattaforma logistica e la rete della distribuzione al dettaglio).

Il sistema Telelogistics, basato su una architettura client/server, e sviluppato con tecnologia Web, si compone di diversi moduli demandati a svolgere tutte le funzionalità previste per il sistema telematico, ossia lo scambio di dati tra tutti i soggetti coinvolti nel processo distributivo: clienti del servizio, operatori della base logistica, flotta di veicoli adibiti alla distribuzione, operatori commerciali, nonché il monitoraggio delle consegne in tempo reale.

##### **Sistema per la predizione evolutiva dei flussi veicolari (EVO-TRAC, Evolutionary Prediction of Traffic Conditions)**

Il sistema sviluppato ha la capacità di predire i flussi di traffico in vari punti nodali della rete dove vengono effettuate misure continue. L'obiettivo è quello di predire i flussi a diverse scale temporali (20 minuti, 1 ora, 6 ore in avanti) con la capacità di inseguire e predire l'evoluzione di situazioni atipiche. Il sistema fa uso di una metodologia particolarmente innovativa basata sull'analisi caotica e su sistemi di predizione evolutivi, cioè un ambiente di organismi (o agenti autonomi) che simulano lo svolgimento di un ecosistema biologico (vita artificiale) in cui la selezione naturale opera in relazione alla capacità dell'organismo di predire correttamente i

flussi veicolari basandosi sulle misure recenti (ultime 8-24 ore). Tale metodologia, derivata da applicazioni sulla modellazione continua di processi di generazione di energia (controllo evolutivo) è caratterizzata dalla capacità di sviluppare un apprendimento continuo e quindi di aggiornare continuamente ed automaticamente il modello predittivo.

Ognuna delle scale temporali su cui si è focalizzata l'attenzione rappresenta una informazione diversa utilizzabile per differenti scopi e finalità. Le predizioni short-term (20 min., 1 ora) sono importanti per offrire una informazione utile alla regolazione in linea del traffico ed a fronteggiare situazioni atipiche o di congestione. Le predizioni a lungo termine (6 ore) sono importanti per le finalità connesse a fronteggiare emergenze di natura ambientale o eventi atipici. Questa differenza si evidenzia anche nella metodologia utilizzata per la predizione. La linea seguita per affrontare entrambe le problematiche è stata quella di utilizzare un approccio basato sulla miscelazione dell'analisi caotica e delle predizioni evolutive con diversa importanza in relazione alla scala temporale: l'analisi caotica maggiormente orientata alle previsioni long-term e la predizione neurale maggiormente orientata alle previsioni short-term. Il sistema è stato testato su vari nodi della rete della città di Terni (64 sensori sull'intero tessuto urbano) ed ha consentito di ottenere una accuratezza di stima sulle predizioni a venti minuti dell'ordine del 3-4% (RMS) e dell'ordine del 6% sulle predizioni ad un ora. Inoltre, il sistema ha dimostrato di rispondere molto bene ai repentini cambiamenti di modello di traffico come quelli che si verificano passando dai giorni feriali a quelli festivi e viceversa o in situazioni incidentali. In tali condizioni, è stata evidente la superiorità rispetto alle reti neurali tradizionali ad apprendimento off-line.

#### **Sistema ISHTAR per la pianificazione del traffico in ambito urbano**

È stato messo a punto in un sistema integrato per la pianificazione degli interventi a breve, medio e lungo termine in ambito urbano, con focalizzazione sulla sorgente di impatto 'trasporti' e con impatti finali costituiti dagli effetti sulla salute e sui monumenti, nonché la valutazione costi/benefici e multicriteri degli interventi postulati.

Il sistema integrato include modelli software di traffico, di consumo ed emissione di inquinati, di rumore e di incidentalità, di dispersione degli inquinanti, di esposizione e di effetti sulla salute, di danno ai beni monumentali e di valutazione globale (tecniche CBA e MCA).

La realizzazione del sistema è stata effettuata nell'ambito di un progetto europeo, coordinato da ENEA, con la partecipazione di 23 organizzazioni; nel corso del 2005 si sono svolti i primi casi di dimostrazione nelle 7 città-siti coinvolte nel progetto: Atene, Bologna, Bruxelles, Graz, Grenoble, Parigi, Roma.

I partners del progetto ISHTAR hanno siglato un preliminare Software Agreement che stabilisce i termini per la futura commercializzazione del prodotto ovvero per la fornitura di servizi di calcolo basati sul prodotto. Potenziali clienti saranno i Comuni e le Province, le Regioni ed alcuni Ministeri, le Agenzie Ambientali, le società di ingegneria e di servizi che operano nel settore in crescita della pianificazione avanzata delle politiche per la Città Sostenibile.

#### **Sistema di accumulo energetico integrato**

I veicoli attuali hanno generalmente un impianto elettrico di bordo a tensione nominale di 12V ed una sola batteria, che è soggetta a sollecitazioni notevoli nelle fasi di avviamento che contribuiscono a limitarne la vita utile. Le limitazioni di questo sistema non consentono di effettuare operazioni ripetute di start-stop del motore del motore a veicolo non in marcia che consentirebbero un apprezzabile risparmio energetico nelle condizioni di guida tipiche del traffico urbano.

Il sistema di accumulo elettrico (brevettato) realizzato presso i laboratori della Casaccia, consente di limitare le sollecitazioni elettriche alla batteria e consente inoltre un recupero parziale dell'energia di frenata con soluzioni circuitali semplici e quindi affidabili e con sovracosti potenzialmente contenuti.

Il sistema è costituito da un circuito elettrico in parallelo alla batteria, basato su supercapacitori di adeguata capacità per sostenere il transitorio iniziale di carica/scarica (frenatura/avviamento) e da un induttore in serie alla batteria. La soluzione non prevede circuiti relativamente complessi basati su convertitori DC/DC in quanto il livello di tensione nominale di funzionamento della batteria è lo stesso dei supercapacitori; inoltre, durante i transitori di carico i flussi di potenza ed energia vengono regolati dall'induttore.

Si tratta di una soluzione originale che si distingue per semplicità realizzativa ed elevata integrazione a bordo del veicolo; il sistema è stato sottoposto a test parametrici e prove di vita che ne hanno confermato la validità.

Il sistema di accumulo integrato, oltre che in campo automobilistico, può trovare applicazioni nella realizzazione di sorgenti di alimentazione non interrompibili.

## 7. PROTEZIONE DELL'UOMO DAGLI AGENTI NOCIVI

### 7.1. *Danni cellulari da agenti nocivi*

Le moderne tecniche di biologia molecolare consentono di mimare il danno che agenti nocivi fisici e chimici possono introdurre nel patrimonio genetico di un organismo. In tale ottica, vengono indagati alcuni meccanismi molecolari che si attivano in una cellula per riparare un danno indotto da radiazioni ionizzanti o agenti chimici sul DNA, per bloccare la proliferazione cellulare, o per indirizzare la cellula verso la morte programmata (apoptosi), allo scopo di individuare specifiche molecole che diano una misura della sensibilità cellulare e forniscano informazioni sulla suscettibilità individuale al danno.

Inoltre, sono sviluppate tecnologie per la valutazione del rischio da agenti nocivi, con particolare riguardo alla identificazione di nuovi biomarcatori di esposizione, effetto e suscettibilità ad agenti tossici. Vengono elaborati modelli per la stima del rischio mediante valutazioni in gruppi di popolazioni esposte, svolgendo un ruolo di raccordo tra il dato sperimentale e quello epidemiologico. I dati ottenuti su biomarcatori a breve termine vengono correlati con le stime di effetti a lungo termine (compromissione del potenziale di fertilità, insorgenza di tumori). Vengono anche effettuate elaborazioni statistiche per la valutazione dello stato di salute delle popolazioni residenti in diversi contesti territoriali, avvalendosi della Banca Dati Epidemiologica dell'ENEA.

Parallelamente alle attività di ricerca a medio-lungo termine, sono condotti studi orientati alla necessità di fornire elementi tecnico-scientifici per la soluzione di problematiche prioritarie di protezione della salute umana, identificate sulla base di conoscenze scientifiche e valutazioni di carattere economico e sociale (inquinamento elettromagnetico e chimico in ambiente urbano, inquinamento da composti con possibile attività endocrina, valutazioni di rischio in particolari ambienti di lavoro).

#### **Studio dei meccanismi molecolari della risposta cellulare al danno da radiazioni ionizzanti e agenti chimici.**

**Cancerogenesi da radiazioni.** Sono stati sviluppati modelli murini di patologie umane, caratterizzati da elevata suscettibilità all'induzione di tumori in seguito a esposizione alle radiazioni ionizzanti. Tali modelli, portatori di specifiche deficienze a carico di geni che intervengono nella regolazione dello sviluppo embrionale, del differenziamento, e nel riparo del danno al DNA, sono stati utilizzati per analizzare i fattori che influenzano lo sviluppo e la progressione di tumori del sistema nervoso centrale e della cute (medulloblastoma e carcinoma a cellule basali, BCC). In particolare sono stati analizzati gli eventi molecolari a carico del gene Patched nell'iniziazione e progressione del medulloblastoma indotto da radiazioni in topi *Ptch*<sup>+/−</sup>. La caratterizzazione istologica e l'analisi molecolare di lesioni con diverso grado di progressione hanno dimostrato che la perdita completa della funzione di Patched è un evento necessario per la progressione delle lesioni preneoplastiche del cervelletto, e ha chiarito i meccanismi molecolari di tale perdita in tumori spontanei e radioindotti. Per quanto riguarda il BCC, è stato dimostrato che lo stato proliferativo delle cellule staminali della cute, da cui il tumore ha origine, influenza non solo l'incidenza ma anche le caratteristiche istopatologiche dei tumori. Sono stati infatti caratterizzati due diversi istotipi con profilo immunistochemical e caratteristiche di crescita specifici. Questi dati sperimentali facilitano la comprensione dei meccanismi di iniziazione e progressione di entrambi i tipi di tumore, e costituiscono un presupposto essenziale per lo sviluppo di terapie efficaci e mirate per le corrispondenti patologie umane.

*Silenziamento genico mediante RNA interference: un nuovo metodo per l'individuazione e lo studio di nuovi bersagli molecolari per la cura dei tumori.* In molti organismi superiori e anche nell'uomo, durante alcune fasi dello sviluppo come pure nella vita dell'individuo adulto, l'espressione di singoli geni può venire inibita da piccoli RNA (microRNA) che vanno ad interferire con i meccanismi di traduzione del RNA in proteina. Abbiamo costruito un vettore di espressione in grado di trascrivere, da un promotore U6, dei microRNA diretti contro la porzione trascritta ma non tradotta all'estremità 3' del RNA messaggero per Insulin Growth Factor Binding Protein-5 (IGFBP-5). L'inibizione della produzione endogena di IGFBP-5, mediante RNA interference, in cellule di neuroblastoma causa diminuzione della proliferazione cellulare, aumento del tasso spontaneo di apoptosi, in modo additivo dopo esposizione a radiazioni ionizzanti. Sono stati effettuati esperimenti di silenziamento dell'espressione del gene slug che si ritiene implicato nel processo di metastatizzazione di molti tipi di tumore. Infine, è stata evidenziata, in vitro e in vivo, la capacità di piccole molecole altamente diffusibili (small molecules) di inibire specifici recettori ad attività tirosina-chinasi.

*Meccanismi di immunoregolazione nella risposta allergica.* La risposta di tipo allergico dipende dalla presenza di anticorpi di classe IgE specifici per l'allergene. I linfociti di tipo Th2 stimolano i linfociti B a produrre IgE. Gli studi della regolazione della produzione di IgE e del differenziamento dei linfociti Th2 sono stati estesi ad un modello murino di risposta immunitaria all'allergene maggiore della *Parietaria judaica*. Al polline di questa pianta risulta allergica una discreta percentuale della popolazione italiana. I risultati ottenuti hanno dimostrato che alterazioni nella regolazione dell'espressione della proteina GATA-3 (analizzata a livello di singola cellula) promuovono il differenziamento dei linfociti T CD4 naive in linfociti Th2 e, conseguentemente, la produzione di IgE. Evidenziando nuovi meccanismi di controllo delle risposte allergiche, questi risultati suggeriscono nuovi possibili bersagli terapeutici.

**Valutazione del rischio per la salute da agenti fisici e chimici mediante nuovi modelli e tecnologie sperimentali**

*Studio degli effetti di sostanze ambientali con potenziale azione interferente con l'omeostasi ormonale (endocrine disruptors).* Nell'ambito di un progetto europeo, sono stati valutati i possibili effetti sull'integrità genetica degli spermatozoi, mediante la tecnica citofluorometrica denominata Sperm Chromatin Structure Assay (SCSA), in circa 800 campioni rappresentativi di varie popolazioni europee diversamente contaminate da PCB e DDT assunti principalmente attraverso la dieta. I risultati hanno permesso di dimostrare, per la prima volta, che la contaminazione da PCB (ma non da DDT) può contribuire a danneggiare l'integrità genomica dello spermatozoo umano. Il risultato è emerso prendendo in considerazione esclusivamente le popolazioni europee caucasiche, mentre non è stato confermato nella coorte costituita dagli Inuit groenlandesi, malgrado questi ultimi siano la popolazione maggiormente contaminata da questi composti: altri fattori (genetici, lo stile di vita, il profilo tossicologico delle miscele individuali di xenobiotici) dovranno essere studiati per spiegare i risultati emersi.

*Rischio genotossico in lavoratori ospedalieri professionalmente esposti a farmaci chemioterapici.* Nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzata del Ministero della Salute, sono state valutate l'incidenza di aberrazioni cromosomiche e di micronuclei in lavoratori ospedalieri professionalmente esposti a farmaci chemioterapici. Inoltre sono stati caratterizzati i polimorfismi genetici relativi a due geni coinvolti nel metabolismo degli xenobiotici e nella detossificazione di farmaci antitumorali (GSTM1 e GSTT1) e a due geni i cui prodotti proteici sono direttamente coinvolti in due distinti processi di riparazione del danno al DNA, XRCC1 e

**XRCC3.** Dai risultati è emerso un aumento statisticamente significativo delle aberrazioni cromosomiche totali e dei micronuclei rispetto ai controlli. Per quanto riguarda i polimorfismi studiati, è stata trovata una lieve significatività tra frequenza di micronuclei e l'allele mutato di XRCC1.

**Bioelettromagnetismo** Sono stati realizzati nuovi sistemi espositivi, elettromagneticamente caratterizzati per le frequenze UMTS della telefonia cellulare e con condizioni ambientali controllate, per l'esposizione di campioni biologici secondo procedura in cieco o a doppio cieco. Tali sistemi sono stati realizzati per esperimenti su animali (ratti per lo studio dell'orecchio interno, topi per il sistema immunitario) e su cellule neuroectodermiche: non sono stati evidenziati ad oggi effetti biologici sulla funzionalità dell'apparato uditivo di piccoli roditori, per dosi diverse corrispondenti alle norme europee vigenti; né sono stati messi in evidenza effetti additivi con antibiotici ototossici; anche le cellule di neuroblastoma non mostrano cambiamenti nella proliferazione, differenziamento, induzione di oncogeni e morte cellulare programmata. Per quanto riguarda il sistema immunitario, gli esperimenti a 900 MHz hanno confermato l'assenza di effetti sulla risposta anticorpale di topi immunizzati ed esposti fino a 4 settimane. Esperimenti sono stati effettuati anche su cellule di glioblastoma umano, esposte a campi magnetici statici, che hanno rivelato alterazioni morfologiche alla microscopia elettronica e a forza atomica.

## **7.2. Radioprotezione**

Le attività in questo campo, svolte dall'Istituto di Radioprotezione (IRP), si articolano in:

- ricerca, sviluppo e qualificazione delle tecniche e delle procedure di monitoraggio e dosimetria delle radiazioni ionizzanti;
- sorveglianza fisica di radioprotezione;
- prestazione di servizi tecnici di dosimetria per terzi.

### **Ricerca, sviluppo e qualificazione**

L'attività di ricerca sviluppata in IRP si fonda su una serie di competenze tecnico-scientifiche che spaziano dalla biologia, alla chimica e alla fisica delle radiazioni, ed è rivolta prevalentemente allo sviluppo di tecnologie e ottimizzazione delle tecniche di dosimetria, a valutazioni radioprotezionistiche per impianti di fusione nucleare nonché a studi sugli effetti delle radiazioni sui tessuti biologici.

Nel seguito, si riporta la sintesi dei principali obiettivi conseguiti nel corso del 2005.

- Nell'ambito della biologia applicata, sono stati ottenuti risultati sperimentali sulla espressione del danno da radiazione a livello genetico, su cellule ematiche, tramite metodi di analisi propri della ricerca bio-molecolare, quali la Comet-FISH (metodica già a livello prototipale per la applicazione in vivo) o la tecnologia dei DNA-microarrays (ampiamente utilizzata negli studi di genetica). Inoltre, sono state dimostrate evidenze sperimentali del cosiddetto "Bystander Effect" (danno genetico indotto in cellule non irraggiate direttamente, ma messe in contatto con il terreno di cellule irraggiate) attraverso sperimentazioni in vivo su topi irraggiati con "basse dosi" di raggi X. In particolare, sono stati valutati la persistenza del danno da radiazioni e l'eventuale effetto di radio-sensibilizzazione o radio-resistenza a successivi irraggiamenti su cellule ematiche provenienti da cavie irradiate con fasci X.
- Nell'ambito delle indagini di tipo chimico e radiotossicologico ai fini di applicazioni in dosimetria interna, sono state perfezionate le tecniche per la determinazione del

contenuto di radionuclidi negli escreti dei lavoratori esposti. Per quanto riguarda la spettrometria alfa, metodo "tradizionale" per la misura degli escreti, si sono qualificati diversi sistemi convenzionali di indagine basati sull'impiego di quattro differenti tipi di estraenti chimici del radionuclide in esame e di tre differenti tecniche di deposizione del composto estratto dalla matrice biologica, definendone potenzialità ed eventuali problematiche connesse. Sono stati, inoltre, effettuati studi preliminari sulla applicazione della tecnica l'ICP-MS anche per determinare basse concentrazioni di Torio-232 in matrici ambientali ed antropiche, in presenza di un elevato contenuto di ioni interferenti, per scopi di dosimetria ambientale e personale.

- È stato eseguito uno studio per la valutazione della dose alla popolazione, sulla base della ricettività ambientale e dati demografici relativi al sito del CR Casaccia, per assicurare la non rilevanza radiologica di un possibile scarico liquido dal Centro, secondo la definizione prevista dalla legge (dose all'individuo del gruppo critico della popolazione inferiore a 10 mSv/anno e dose collettiva inferiore ad 1 Sv-uomo).
- Nel campo della dosimetria delle radiazioni naturali, è stato messo a punto uno strumento prototipo per la verifica del fattore di equilibrio del radon ed i radionuclidi figli. Inoltre, è stato ottimizzato il dosimetro "radon" attualmente utilizzato. Il dosimetro è ora oggetto di potenziale brevettazione.

Le attività di qualificazione sono consistite principalmente nella partecipazione ad iniziative di interconfronti nazionali ed internazionali (oltre che di intercalibrazione fra i laboratori IRP) e nella partecipazione a gruppi di lavoro nazionali e internazionali (UNI, ISO, IEC, EURADOS) e commissioni di riferimento nel campo della dosimetria delle radiazioni (i.e. ICRU, ICRP, IAEA).

#### **Attività di sorveglianza fisica di radioprotezione in ENEA**

L'attività di sorveglianza fisica di radioprotezione ha compreso:

- la funzione di esperto qualificato per le attività con rischio da radiazioni ionizzanti
- l'attività di archivio dosimetrico per un totale di circa 500 lavoratori esposti ENEA e oltre 100 ospiti a vario titolo (i.e. borsisti, tirocinanti, laureandi, dipendenti terzi);
- la sorveglianza di radioprotezione operativa (dosimetria ambientale, sopralluoghi periodici negli impianti/laboratori, misure di caratterizzazione radiologica degli ambienti di lavoro);
- la dosimetria ambientale ex art.54 D.Lgs.230/95 per il sito del CR Casaccia;
- la dosimetria individuale esterna ed interna per i lavoratori ENEA e lavoratori SOGIN esposti alle radiazioni;
- analisi radiometriche su campioni di impianto e campioni prelevati in ambienti di lavoro.

I risultati delle attività di fisica di radioprotezione sono sintetizzati nella tabella seguente.



**Numero e tipologia delle misure di sorveglianza fisica di radioprotezione svolte per ENEA**

|                                                                            | N° misure | N° misure fornite SOGIN |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Interventi di Radioprotezione Operativa (RPO) presso impianti e laboratori | 2000      | —                       |
| Dosimetria esterna (dosimetri forniti)                                     | 10000     | 1200                    |
| Dosimetria interna (misure effettuate)                                     | 1500      | 800                     |
| Dosimetria su campioni ambientale (misure effettuate)                      | 4500      | 800                     |
| Monitoraggio radon                                                         |           | —                       |
| Sopralluoghi                                                               | 10        |                         |
| Misure                                                                     | 50        |                         |
| Taratura strumentazione radioprotezione e dosimetri                        | 30        | —                       |

**Prestazione di servizi tecnici a terzi**

Le tecniche di dosimetria sono oggetto di servizi svolti per terzi sulla base di tariffe ENEA. L'attività IRP svolta per terzi nell'anno 2005 è sintetizzata nella tabella seguente.

**Servizi di "radioprotezione e dosimetria"**

| Servizio                                    | Utenti | N° misure |
|---------------------------------------------|--------|-----------|
| Dosimetria esterna                          | 250    | 80 000    |
| Monitoraggio radon                          | 40     | 5000      |
| Dosimetria interna                          | 10     | 250       |
| Misure radiometriche su campioni ambientali | 5      | 100       |
| Taratura strumentazione radioprotezione     | 20     | 30        |

Inoltre, è stata formalizzata una specifica commessa da parte del Ministero delle Finanze per eseguire interventi di monitoraggio del radon e valutazioni dosimetriche e per fornire indicazioni sulle possibili azioni di rimedio.

**7.3. Metrologia delle radiazioni ionizzanti**

L'attività dell'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti ha riguardato, come per gli anni passati, il ruolo di "Istituto Metrologico Primario" assegnato all'ENEA dalla legge n. 273/1991 nel settore delle radiazioni ionizzanti. In base a questi compiti, l'Istituto ha proseguito nel 2005 la propria attività di ricerca finalizzata allo sviluppo dei campioni primari nazionali per la misura delle radiazioni ionizzanti. All'attività di ricerca è stata affiancata l'attività di taratura degli strumenti di misura delle radiazioni ionizzanti per soddisfare la richiesta nazionale nel settore. L'attività dell'Istituto ha riguardato inoltre i ruoli assegnati all'ENEA rispettivamente dalla legge n. 132/1988 (procedure e prove per l'omologazione degli strumenti di misura in ambito UE), e dai dlgs. n. 230/1995 e n. 241/2000 (obblighi di taratura e criteri di approvazione dei dosimetri delle radiazioni ionizzanti).

**Campioni primari nazionali***Campioni per la dosimetria della radiazione x, gamma ed elettroni*

È stato migliorato il livello di accuratezza dei campioni di kerma in aria per la radiazione del  $^{60}\text{Co}$  e per la radiazione x di bassa e media energia tramite il conseguimento dei due obiettivi seguenti:

- analisi e caratterizzazione, mediante calcolo Monte Carlo (EGS), della dipendenza dallo spettro della radiazione gamma del fattore correttivo  $K_{\text{wall}}$  per le 6 camere campione utilizzate per la misura assoluta di kerma in aria, necessario per le misure in radioterapia e in radioprotezione;
- determinazione, in nuove condizioni sperimentali, dei fattori  $k_{\text{sc}}$ ,  $k_{\text{fl}}$  e  $k_e$  (che correggono rispettivamente per gli effetti dovuti alla radiazione diffusa, ai fotoni di fluorescenza e alla perdita di elettroni negli elettrodi) per le due camere ad aria libera, campioni nazionali di kerma in aria per la radiazione x di bassa (10-50 kV) e media (100-250 kV) energia d'interesse in radioprotezione e radiodiagnostica.

*Campioni per la misura dei radionuclidi di uso medico e ambientali (radon, ecc.)*

- Sono stati sviluppati nuovi campioni primari per la misura del  $^{18}\text{F}$ , del  $^{32}\text{P}$  e dello  $^{125}\text{I}$  usati in medicina nucleare. Quest'attività di ricerca e sviluppo è stata stimolata dalla crescente richiesta di taratura della strumentazione di misura per questi radionuclidi, proveniente da diversi Centri operanti nel Paese nella radiodiagnostica per immagini tramite tecniche PET (positron emission tomography) e SPECT (single photon emission computed tomography).
- Sono state ampliate le prestazioni dei sistemi sperimentali campione necessari per l'affidabilità delle misure del radon nell'ambiente e per soddisfare le richieste in tal senso dell'APAT e delle agenzie regionali ARPA. In particolare, è stato realizzato un nuovo campione primario di radon in aria basato sulla estrazione del radon da sorgenti di sali di radio in soluzione acquosa ed il suo completo trasferimento in un circuito di volume noto cui è associato un sistema di misura (monitor) di riferimento. È stata inoltre realizzata la nuova cella spettrometrica con campionamento elettrostatico destinata a svolgere le funzioni di riferimento di riferimento per la standardizzazione dell'atmosfera della camera climatizzata da 1 m<sup>3</sup>. È stato quindi realizzato il nuovo apparato di taratura degli strumenti di riferimento per la misura del radon ai fini della standardizzazione dell'atmosfera della camera radon praticabile (walk-in chamber).

**Tarature e accreditamento di laboratori**

Per l'attività riguardante la taratura della strumentazione radiometrica richiesta a livello nazionale, e l'accREDITAMENTO di centri di taratura SIT sono stati conseguiti i seguenti obiettivi:

- nell'ambito dell'attività di riferimento svolta dall'Istituto per la qualificazione e la caratterizzazione degli acceleratori clinici del tipo Novac e Liac usati a livello nazionale e internazionale per la radioterapia intraoperatoria (IORT), è stata effettuata la taratura dei fasci di elettroni ad alta dose per impulso di 4 Centri di radioterapia. Questo particolare servizio di taratura basato su sistemi campione (dosimetria chimica) sviluppati dall'Istituto è fra i pochi ad essere disponibile a livello internazionale;
- nel settore della dosimetria in radioterapia e in radioprotezione è stata effettuata la taratura di 40 sistemi dosimetrici utilizzati nei centri italiani di radioterapia, sono state effettuate 19 certificazioni di taratura relative a 4 dosimetri di centri SIT e a 15 sorgenti radioattive per l'APAT. Il ridotto numero di tarature (rispetto agli anni passati) per gli strumenti di misura radioprotezionistici, è stato causato dall'inagibilità (praticamente

per tutto il 2005) di molti dei laboratori dell'Istituto interessati da lavori di ristrutturazione;

- è stata effettuata per la prima volta da parte dell'Istituto la impegnativa taratura di strumenti di misura di sorgenti per radiodiagnostica medica: per sorgenti di  $^{99m}\text{Te}$  presso il reparto di Medicina Nucleare dell'Ospedale Pediatrico Bambino Gesù di Roma, e per sorgenti di  $^{18}\text{F}$  in uso presso il Centro PET della IRMET, Torino e presso l'Officina Farmaceutica Amersham Health S.r.l nel Joint Research Centre di Ispra;
- riguardo alla taratura di strumenti di misura del radon è stato profuso un notevole impegno qualitativo e quantitativo per mettere a punto il campione camera radon climatizzata da  $1\text{ m}^3$  e il laboratorio radon associato. Questo campione è infatti necessario per soddisfare molta parte della domanda di tarature sul radon e per svolgere la campagna nazionale di interconfronti sui dosimetri del radon organizzata dall'APAT e da iniziarsi ai primi del 2006. Si è trattato di un lavoro preparatorio molto complesso i cui risultati consentiranno a tutti i laboratori delle Agenzie ARPA e ad altri soggetti interessati (circa 40 partecipanti complessivamente) di partecipare a questo interconfronto. In questa campagna di misure saranno coinvolti circa un migliaio di dosimetri del radon di tipo passivo.

#### **Standardizzazione e affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti**

Nel campo dei metodi finalizzati al miglioramento dell'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti, sono stati conseguiti i seguenti principali obiettivi.

#### ***Svolgimento del programma di affidabilità (2005) per la misura della radiazione gamma in collaborazione con il sistema nazionale APAT/ARPA.***

Il programma di affidabilità per i laboratori delle Agenzie Regionali ARPA preposti al controllo della radioattività ambientale è stato svolto, come in passato, in stretta collaborazione con l'APAT. In particolare, è stato svolto un interconfronto su misure di spettrometria gamma in sorgenti su filtro. L'interconfronto ha coinvolto 55 laboratori situati sul territorio nazionale, per valutarne l'affidabilità in specifiche misure di radioattività ambientale.

#### ***Misure assolute della luce di sincrotrone (Elettra)***

È proseguita la collaborazione fra l'Istituto e i laboratori del Consorzio Elettra (Trieste) per lo sviluppo di un sistema di misura dei fasci di radiazione ("luce di sincrotrone") mediante i campioni nazionali dell'Istituto. Si sono concluse le prove di stabilità del fascio di radiazione prodotto dal sincrotrone di Elettra, l'acceleratore dedicato alla produzione di luce di sincrotrone di cui è prevista l'utilizzazione per radiodiagnostica medica ad alta risoluzione.

#### ***Sviluppo di metodi dosimetrici per radioterapia***

È stato messo a punto un programma di calcolo basato sul codice Monte Carlo EGS per la simulazione dell'irraggiamento in fantoccio di acqua con fasci di fotoni ed elettroni di alta energia dei dosimetri di riferimento a solfato ferroso che sono prodotti dall'Istituto per la taratura e la caratterizzazione degli acceleratori clinici del tipo Novac e Liac per radioterapia intraoperatoria (IORT). Questi acceleratori sono prodotti dall'industria nazionale e hanno riscontrato un notevole favore nel settore della radioterapia anche grazie ai metodi dosimetrici sviluppati dall'Istituto di metrologia.

## 8. NUOVI MATERIALI PER L'INDUSTRIA

### 8.1. *Materiali funzionali e loro tecnologie di integrazione*

#### **Materiali funzionali “integrabili”**

I materiali funzionali sviluppati o analizzati nel 2005, che qui definiamo “integrabili”, perché spesso suscettibili di integrazione in dispositivi completi, appartengono praticamente tutti al settore dei polimeri funzionali.

È stata messa a punto definitivamente una vernice ossigeno-sensibile, e completata la misura della fotoluminescenza indotta dalla pressione esterna di ossigeno, constatando che le sue prestazioni sono comparabili allo stato dell'arte dei prodotti convenzionali. Questo risultato consentirà di analizzare nel 2006 un eventuale trasferimento di know-how.

Inoltre è stato messo a punto un modello che descrive uno dei comportamenti comuni per i polimeri compositi utilizzati nella realizzazione di sensori di gas, cioè la variazione della resistività in funzione del rigonfiamento della matrice polimerica sotto l'azione di specifici gas. Sono stati poi attivati vari contratti esterni per lo sviluppo di materiali elettroluminescenti a base di ossadiazoli e polifluoreni, suscettibili di integrazione in diodi organici emettitori di luce. In attesa dei risultati, sono stati in parallelo messi a punto nuovi diodi di colore rosso basati su composti evaporati di europio. Nello stesso filone, quello della realizzazione di display piatti OLED, sono iniziati gli studi per la realizzazione di strati trasparenti e conduttori flessibili: constatata le ridotte prestazioni dei composti a base di nanoparticelle di ITO (Indium Tin Oxide) e ATO (Antimony T. O.), sono stati acquisiti nanotubi di carbonio funzionalizzati per essere solubili in acqua, e cominciate le sperimentazioni per mescolarli a polimeri conduttori ed applicarli a substrati di vario tipo, anche flessibili.

#### **Integrazione dei materiali in dispositivi e prototipi**

Nelle camere pulite del centro di Portici sono state realizzate delle matrici di fotodiodi a base di silicio amorfo, è stata misurata la loro risposta alla luce e sono state completate le relative simulazioni circuitali, al fine di valutare la possibilità di inserire tali matrici in rivelatori di luminescenza di materiali biologici marcati, in competizione con dispositivi a base di silicio cristallino realizzati da IRST-Trento.

Sul fronte dei sensori scintigrafici, sono stati depositati due brevetti, uno dei quali riguarda sensori compatti basati su scintillatori convenzionali e su fotorivelatori a stato solido, e l'altro “fantocci” microscopici per la calibrazione ad alta risoluzione dei rivelatori, a base di silicio poroso impregnato di radioemettitori. Il concetto del sensore scintigrafico miniaturizzato è stato oggetto di alcune operazioni di marketing, che fanno intravedere sia la collaborazione con IRST-Trento per la fabbricazione di fotorivelatori specifici, sia la possibilità di realizzare lo sviluppo dei nuovi dispositivi con alcune PMI.

### 8.2. *Qualificazione di materiali e componenti e metodologie di misura e metrologia*

Le attività programmatiche svolte nel 2005 derivano da un importante pacchetto di progetti di ricerca strategica ed industriale e sono finalizzate alla dimostrazione dell'applicabilità di tecnologie e metodologie innovative, mediante l'esecuzione di campagne di sperimentazione, le cui procedure, soprattutto per quello che riguarda le applicazione di controlli non distruttivi e diagnostica, gli invecchiamenti ed i modelli di degrado di materiali e dispositivi, sono state definite e validate da ENEA. In questo quadro, ENEA ha anche messo a punto, nell'ambito di

una collaborazione con il Dipartimento della Protezione Civile, una tecnologia di allarme preventivo (early warning) da utilizzare per la salvaguardia di strutture strategiche in presenza di eventi catastrofici (ad esempio difesa dal sisma di strutture a sviluppo verticale, quali statue od altri manufatti di rilevante interesse storico artistico).

Per quanto riguarda le applicazioni industriali, un settore di particolare importanza è quello dei trasporti, soprattutto quelli ferroviari, ove sono state sviluppate metodologie (Single Value Decomposition e filtro di Karman) da applicare all'analisi dei dati provenienti dal monitoraggio ed il controllo di infrastrutture ferroviarie (viadotti, ponti, ecc.) e del materiale rotabile (binari, rodiggio, ecc.) in collaborazione con due delle società partecipate ENEA e precisamente i Consorzi TRE e TRAIN.

Il sistema integrato di laboratori e tecnologie che l'ENEA possiede si caratterizza per un notevole grado di unicità che ha consentito, anche nel 2005, la fornitura di servizi tecnologici (applicazioni strutturali, industriali e diagnostica applicata al patrimonio artistico) con una crescita rispetto all'anno precedente. In particolare, sono state concluse numerose campagne di prova a favore di industrie (Powerflex, Contraves, Siemens, Ansaldo, Mesar, Alstom, Eis, TARRC, Linari Engeneering, Breda, OMC, Alenia Marconi, ecc.), Enti ed Università (INFN, Univ Bologna, Roma "la Sapienza", ICR, ARCHIRES, ecc.) oltre che Enti Locali (Comune di Bracciano, di Genova, ecc.).

Inoltre è stato realizzato in Casaccia (e brevettato), un prototipo di laboratorio, unico in Europa, per la taratura di accelerometri e sismografi fino a 0.01 Hz ed avviate le sperimentazioni preliminari per definire le necessarie procedure di accreditamento tramite l'Istituto Colonnetti.

### **8.3. *Metodi e processi di sintesi e caratterizzazione di materiali nanofasici e nanostrutturati***

#### **Sintesi e caratterizzazione di metalli e di semiconduttori sotto forma di nanoparticelle**

Le attività si sono focalizzate sulla funzionalizzazione delle nanoparticelle con molecole organiche (polimeri coniugati) e la caratterizzazione delle proprietà strutturali, funzionali, ottiche ed elettriche, con l'obiettivo di realizzare nanocompositi polimerici con proprietà ottiche, optoelettroniche e sensoristiche specifiche. Sono state messe a punto diverse strategie di sintesi colloidale che hanno dato ottimi risultati per quanto riguarda la qualità dei materiali prodotti in termini di controllo della dimensione e forma delle nanoparticelle e della cristallografia, costituita da singolo cristallo. Le proprietà ottiche di fotoluminescenza sono paragonabili a quanto riportato in letteratura.

Relativamente alla fabbricazione di nanocompositi con nanoparticelle di semiconduttori II-VI (CdS e ZnS) in matrice polimerica ottenuti per via termolitica si è intrapresa la via dell'irraggiamento laser di polimeri "caricati" con i precursori idonei (tiolati di metallo) al fine di mettere a punto metodi che consentano di realizzare strutture patternate.

Per quanto riguarda la sintesi di nanofasi mediante impiantazione ionica, sono stati approfonditi gli studi sulla sintesi di nanofasi di leghe magnetiche a forte anisotropia quali FeAl e composti semiconduttori basati su ZnO individuando i limiti e le potenzialità della metodologia e delineando le strategie per la sintesi di materiali con forte potenzialità tecnologica

Relativamente al processo per l'elettrodeposizione di nanocluster metallici su substrati a base di carbonio si è verificata la ottima adesione al substrato e si sono verificate le proprietà di catalisi per la crescita di nanostrutture di carbonio mediante diverse tecniche (HFCVD, Thermal CVD, PECVD).

**Materiali nanostrutturati per applicazioni energetiche**

La messa a punto di processi per produrre idrogeno mediante cicli termochimici basati sull'acqua ha visto lo studio e la sperimentazione dei sistemi liquidi bifasici per la sintesi micellare di prodotti solidi nanostrutturati, in particolare della ferrite di manganese, che consentirà la produzione di ferriti nanometriche con uno spread dimensionale molto stretto. È stata ottenuta una ferrite di manganese con dimensioni 2-5 nanometri. È stata installata, ed è in fase di sperimentazione, un'apparecchiatura TPD/TPR che sarà utilizzata per lo studio della generazione di idrogeno nel sistema  $H_2O$ /Ferrite di manganese/ $Na_2CO_3$  e nella riduzione del manganese III del sistema  $Na(Mn,Fe)O_2/CO_2$ .

Per quanto riguarda i materiali per lo stoccaggio di  $H_2$ , le attività hanno seguito due filoni relativi al trattamento di quantitativi significativi di materiali tradizionali ed allo sviluppo di leghe leggere.

Riguardo alla prima attività, è terminata la fase di installazione dell'impianto di ball milling in scala pilota preindustriale, è stata avviata la fase di validazione ed è stato realizzato un brevetto su di un procedimento allo stato solido per la produzione di un materiale composito da utilizzare per l'accumulo di idrogeno.

Riguardo alla seconda attività, relativa a materiali nanocompositi a base di Mg, le attività sperimentali, inizialmente avviate con successo sul sistema  $Mg_2NiH_4$  (35 wt.%) -  $MgH_2$  (65 wt.%), sono state estese ad altri sistemi ed in particolare al sistema  $MgH-LaNi_5$  con lo scopo di modellizzare gli effetti sinergici che si instaurano fra le due fasi.

Dal punto di vista teorico, è stato realizzato uno studio sistematico dell'effetto di elementi di transizione sulla termodinamica del sistema ternario a base  $MgH$ . Gli studi sono stati realizzati mediante calcoli di struttura elettronica in teoria del funzionale densità (codice Abinit) e l'analisi ha considerato una dozzina di elementi con lo scopo di valutare l'effetto di abbassamento del calore di soluzione a concentrazioni comprese tra il 2 e il 10% mol.

**Sintesi e caratterizzazione di nanotubi di carbonio**

Le attività di sintesi sono proseguite lungo due direttrici, deposizione chimica da fase vapore (CVD) e scarica ad arco in ambienti non convenzionali.

Nel primo caso, CVD termico su catalizzatori, è stato sviluppato un catalizzatore a base di Fe per ottenere quantità di CNT sufficientemente puri da permetterne l'utilizzo in matrici o in strati spessi per la realizzazione di sensori o elettrodi. È stato poi messo a punto il processo di sintesi mediante RF PE CVD per sintesi a bassa temperatura di nanotubi e nanowalls su substrati catalizzati per nanostrutture depositate su larga area, compatibilmente con i processi a bassa temperatura della microelettronica. Inoltre si è messa a punto la metodologia per la crescita orientata mediante HFCVD e applicazione di una polarizzazione elettrica.

Per quanto riguarda la scarica ad arco, le attività sulla nuova apparecchiatura in grado di omogeneizzare la scarica e di mantenerne costante la corrente si è concentrata su due filoni. Da una parte, sono stati messi a punto metodi sperimentali basati sulla diffrazione a raggi X e sulla analisi termica differenziale in grado di misurare in maniera quantitativa la concentrazione di nanotubi nel materiale sintetizzato e, dall'altra, si è sperimentata con successo la possibilità di alimentare in corrente alternata l'apparecchiatura al fine di ottimizzare le condizioni per la sintesi di nanoborn di tipo bud-like.

È stato infine realizzato un dispositivo sensoriale per l'idrogeno a temperature criogeniche basato sull'accoppiamento dei film di cui sopra con dispositivi a fibra ottica per il quale è stata depositata una domanda di brevetto.

#### **8.4. Processi e tecnologie di sintesi, trattamento e rivestimento di materiali e componenti**

##### **Rivestimenti a base di carbonio con tecniche CVD**

Le attività di questo obiettivo si articolano su tre settori principali di intervento: processi e tecnologie di sintesi; tecnologie di trattamento e rivestimento; tecnologie di giunzione.

Per quanto attiene al primo settore, processi e tecnologie di sintesi, le attività del 2005 hanno riguardato lo sviluppo di nuove metodologie sperimentali e l'implementazione degli apparati CVD già esistenti, al fine di variare e controllare i processi di sintesi e le caratteristiche dei materiali prodotti. In tale ambito, è stato ottimizzato il funzionamento di un reattore CVD termico ed è stato sviluppato un sistema analogo in cui il processo è assistito da plasma eccitato da scarica in corrente continua.

È proseguita l'attività di sintesi di diamante nanocristallino mediante la tecnologia HF-CVD, accompagnata dal processo di Bias Enhanced Nucleation (BEN). Le stesse tecnologie di sintesi sono state impiegate per il rivestimento di tessuti di fibre di carbonio commerciali con nanotubi di carbonio. È stato testato l'ancoraggio dei nanotubi alle fibre e sono state eseguite le prime prove di realizzazione di materiale composito a matrice polimerica.

Nel secondo settore, tecnologie di trattamento e rivestimento, ricadono le attività di sviluppo di dispositivi e processi di deposizione di tipo fisico per la realizzazione di rivestimenti sottili. In questo ambito, sono stati realizzati multistrati TiN/ZrN mediante la tecnica di deposizione RF sputtering reattivo al variare dello spessore della coppia di nitruri (1). Dall'analisi XRD è stata evidenziata la formazione di una struttura a superreticolo per  $l=9$  nm. Tale superreticolo presenta delle proprietà meccaniche e chimiche notevolmente superiori rispetto ai materiali TiN e ZrN dei due singoli strati cresciuti nelle stesse condizioni. Infatti, la microdurezza del superreticolo è 1,25 volte maggiore della durezza dello ZrN, ma ben 2,5 volte superiore rispetto a quella del TiN. L'assenza di cricche per carichi inferiori a 300gf ha dimostrato l'alta tenacità della struttura a superreticolo. Inoltre, il superreticolo ha dimostrato una alta resistenza alla corrosione in ambiente salino, conservando le sue proprietà elettriche dopo 3 ore di esposizione a vapori corrosivi.

Rivestimenti nanocompositi in TiN/SiN sono stati realizzati con upgrading degli impianti per permettere la codeposizione di conduttori e isolanti. I rivestimenti sono stati utilizzati per testare vari modelli di nanoindentazione in collaborazione con il laboratorio di meccanica dell'Università di Lille.

Sono stati ottimizzati i parametri dei processi di deposizione PVD e EDP di strati molto sottili metallici, continui o a cluster, cluster atti a funzionare da catalizzatori di processi di crescita di nanostrutture di carbonio e di processi elettrochimici. In particolare, per la realizzazione di elettrodi innovativi ad alta efficienza per PEFC e DMFC sono stati depositati cluster di Pt su substrati di carbone ad alta superficie specifica e a base di nanotubi di carbonio. A parità di quantità di Pt impiegata, questi depositi hanno mostrato una attività catalitica superiore ai catalizzatori ottenuti per riduzione chimica.

È proseguita l'attività di ottimizzazione dei parametri di processo per la deposizione EPD (Electrophoretic Deposition) di coating ceramici su substrati metallici e per il successivo trattamento di densificazione con fascio elettronico. Le prove di adesione hanno dimostrato che un trattamento termico non convenzionale con un fascio ad alta densità di energia con un forte confinamento in profondità, quale il fascio elettronico, conferisce al coating EPD una buona compattazione ed un'adesione al substrato 100 volte superiore a quella del coating EPD tal quale.

Infine il terzo settore, tecnologie di giunzione, comprende sia attività di sviluppo di nuove tecniche di saldatura, sia attività di sviluppo di nuove metodologie sperimentali per la saldatura di materiali speciali, utilizzando tecniche già ottimizzate.

Nell'ambito delle attività di sviluppo di processi innovativi di saldatura, per la realizzazione di pannelli strutturali impiegati nel settore navale, è stata progettata e realizzata una testa per la saldatura ibrida LASER MIG associata ad una torcia push-pull ESAB. La testa permette 6 gradi di libertà per garantire una regolazione ottimale della posizione relativa fra punto di incidenza LASER e interazione MIG.

Sono state avviate le attività relative alla messa a punto di un'attrezzatura per la saldatura ad elevata velocità di film polimerici sottili mediante laser, da un canto verificando la possibilità di utilizzare le attrezzature esistenti, dall'altro ottenendo in dotazione da INFN una attrezzatura indipendente dotata di tavola rotativa con controllo della velocità indipendente e trasportabile su differenti stazioni di lavoro.

#### **8.5. Materiali strutturali monolitici e composti**

##### **Ceramici e composti**

Il materiale ceramico strutturale, sviluppato precedentemente dall'ENEA, e in grado di autopassivarsi in condizioni ambientali critiche, quali quelle dei recuperatori di calore nell'industria di produzione del vetro, è stato riproposto per la realizzazione di pale di turbina statoriche da impiegare nella propulsione aeronautica. Il materiale, oggetto di brevetto, è costituito da una miscela a base di SiC e AlN con ossidi ceramici, ha caratteristiche meccaniche molto interessanti ed in particolare migliora la tenacità del SiC tal quale che costituisce il punto critico di questo materiale.

Sulla base degli standard di affidabilità richiesti per le applicazioni di cui sopra, sono continuati gli approfondimenti per lo sviluppo e la messa a punto di metodologie di progettazione di componenti realizzati con materiali a bassa tenacità, in particolare per dare risposta alle problematiche di trasferimento dei risultati delle prove sui campioni di piccole dimensioni alla previsione di comportamento dei componenti reali.

Le attività inerenti i materiali metallici per l'energia hanno riguardato la caratterizzazione di materiali per la fusione e la caratterizzazione della meccanica della frattura e della propagazione di cricche di superleghe per turbine.

È stata svolta una ampia e approfondita serie di studi mediante simulazioni di dinamica molecolare con potenziali empirici su sistemi di grande taglia (100-300.000 atomi) allo scopo di validare la teoria termodinamica della frattura di Griffith. Il materiale adottato come prototipo di sistema fragile è il SiC, già impiegato negli studi precedenti di stabilità di una cricca in presenza di inclusioni. Lo studio del criterio di Griffith ha permesso di evidenziare importanti deviazioni su scala atomica dalla fisica del continuo, stabilendo limiti di validità e di applicabilità del criterio e fattori correttivi per materiali idealmente fragili.

Nell'ambito di questa stessa linea, è stato completato lo studio della variazione di fracture toughness in SiC in presenza di inclusioni rigide e morbide: è stata trovata una legge di scaling universale che, su base atomica, permette di descrivere in un contesto unico i risultati teorici ottenuti asintoticamente per piccole o grandi distanze cricca-inclusione, su un vasto intervallo di mismatch elastico fra inclusione e matrice.

È stato continuato lo sviluppo del modello multiscala multiscampo, aggiungendo ai campi scalari precedentemente definiti nel codice a elementi finiti MUSCAFE (interamente sviluppato in Casaccia) anche il campo di rotazione locale. Questa estensione ha permesso una applicazione molto interessante, del calcolo di una trave polimerica rinforzata con dispersione di fibre di vetro (un materiale di vastissimo uso industriale). Per questo sistema sono stati calcolati diversi modi di deformazione standard, riuscendo a mettere in evidenza la componente di deformazione locale legata alla rotazione interna delle fibre rigide.