

Gianmarco Manzini - Curriculum Vitae

5 luglio 2010

Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche
del Consiglio Nazionale delle Ricerche (**IMATI-CNR**),
Via Ferrata 1, I27100 Pavia.
Tel. (+39)0382548238 - Fax. (+39)0382-548300.
Email: marco.manzini@imati.cnr.it.

DATI PERSONALI

Data di nascita: 12 Novembre 1961
Luogo di nascita: Cremona
Nationalità: italiana

POSIZIONI PROFESSIONALI

Dicember 2005 – posizione attuale.

Primo Ricercatore presso l'Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche (**IMATI**)¹ del Consiglio Nazionale delle Ricerche (**CNR**) di Pavia;

Gennaio 1997 – Dicembre 2005.

Ricercatore presso l'Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Pavia;

Ottobre 1993 – Dicembre 1996.

Ricercatore nel gruppo di *Meccanica Computazionale*² diretto dal Prof. A. Quarteroni presso il Centro Ricerche, Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna (**CRS4**) sito in Cagliari, Italia;

Ottobre 1989 – Settembre 1993.

Ricercatore nel gruppo di *Fluidodinamica Computazionale* diretto dal Dr. M. Meneguzzi presso il Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (**CERFACS**) in Tolosa, Francia;

Settembre 1987 – Settembre 1989.

Analista in modellizzazione matematica di problemi geofisici presso *Geomath Srl*, Pisa, Italia.

PERIODI ALL'ESTERO

Settembre-Novembre 2010.

Visiting scientist presso il **Laboratoire de Mathématiques "Jean Leray"**, Università di Nantes, Francia;

Aprile – Maggio 2010.

Visiting scientist presso il **Los Alamos National Laboratory (LANL)**, Los Alamos, New Mexico, USA;

¹già Istituto di Analisi Numerica (IAN)

²già gruppo di *Matematica Applicata e Simulazione*

Luglio 2009.

Visiting scientist presso il **LANL** in Los Alamos, New Mexico;

Marzo – Aprile 2009.

Visiting scientist presso il **Centre de Mathématiques et Informatique – Laboratoire d’Analyse, Topologie et Probabilité (CMI-LATP)**, Università di Marseille-Provence, Francia;

Giugno – Luglio 2007.

Visiting scientist presso il Laboratoire de Mathématiques “Jean Leray”, Università di Nantes, Francia;

Luglio 2005, Febbraio – Marzo 2002, Maggio – Settembre 2001.

Visiting scientist nel gruppo di Numerical Linear Algebra diretto dal Prof. I. Duff presso il **Rutherford-Appleton Laboratory (RAL)**, Oxfordshire, UK;

Agosto 1997.

Visiting scientist nel team di Parallel Algorithms diretto dal Prof. I. Duff presso il **CERFACS** di Tolosa, Francia.

GRANT/BORSE DI STUDIO INTERNAZIONALI

2010.

Vincitore del grant del programma annuale per visitatori stranieri dell'**Università di Nantes** per collaborare con il Prof. Y. Coudière presso il **Laboratoire de Mathématiques “Jean Leray”**;

2009.

(i) Vincitore del grant **CNR** nell’ambito del programma **Short Term Mobility 2009** per collaborare con il Dr. K. Lipnikov presso il **LANL** in Los Alamos, New Mexico, USA;

(ii) Vincitore del grant del programma annuale per visitatori stranieri dell'**Università di Marseille-Provence** per collaborare con la Prof. F. Hubert presso il **CMI-LATP**;

2008.

Vincitore del grant del **Programma Professori Visitatori** del Gruppo Nazionale per il Calcolo Scientifico – Istituto Nazionale di Alta Matematica (**GNCS-INdAM**) per finanziare la visita del Prof. Yves Coudière all'**IMATI-CNR** di Pavia nel mese di Luglio 2008;

2007.

Vincitore del grant del programma annuale per visitatori stranieri dell’Università di Nantes per collaborare con il Prof. Y. Coudière presso il Laboratoire de Mathématiques “Jean Leray”;

2005.

Vincitore del grant **CNR** nell’ambito del programma del **Short Term Mobility 2005** per collaborare con il Dr. M. Arioli presso il **RAL**;

2001.

Vincitore del grant GR/R46427/01 assegnato dall'ente britannico **Engineering and Physical Science Research Council (EPSRC)** per il programma di ricerca *Direct and iterative methods for solving augmented systems related to mixed finite element methods* in collaborazione con il Dr. M. Arioli presso il **RAL**;

1996 – 1997.

Vincitore del grant biennale assegnato dalla Conferenza dei Rettori delle Università Italiane (**CRUI**) nell'ambito del **Programma Galileo** di cooperazione scientifica bilaterale italo-francese per il progetto di ricerca *Monitoraggio e bonifica di suoli inquinati di aree costiere del Mediterraneo*, in collaborazione con il Dr. L. Giraud, (responsabile francese presso il **CERFACS**) e con il Dr. C. Gallo (**CRS4**);

1989 – 1993.

Vincitore di un grant quadriennale assegnato dal **Governo Francese** per lavorare in qualità di ricercatore straniero presso il **CERFACS** alla preparazione della tesi nell'ambito del **Doctorat 3ème cycle** dell'**Università "P. Sabatier", Toulouse III**, Francia.

ATTIVITÀ PROFESSIONALI

2009.

Organizzatore del Benchmark per Problemi Tridimensionali di Diffusione Anisotropa in collaborazione con le Proff. F. Hubert e R. Herbin, CMI-LATP, Università di Marseille-Provence, Francia, tenutosi in Porquerolles, 22-26 Giugno 2009;

2005 – presente.

Coordinatore presso l'**IMATI-CNR** di Pavia del progetto di ricerca *Metodi numerici avanzati per la meccanica dei fluidi*, codice SIGLA TAP04-IMATI-C07, Dipartimento Terra & Ambiente, **CNR**;

2005.

Membro dell'*International Advisory Scientific Committee* per l'organizzazione del convegno *Third International Conference on Fluid Structure Interaction*, 19-21 Settembre 2005, La Coruña, Spagna;

2000 – 2002.

Responsabile presso l'**IMATI-CNR** del progetto di ricerca *Algoritmi innovativi dell'algebra lineare nella simulazione ed ottimizzazione per la compatibilità elettromagnetica industriale e ambientale* nell'ambito del *Progetto Coordinato Agenzia 2000* diretto dal Dr. P. Fernandes (**IMATI-CNR**, sezione di Genova).

FORMAZIONE SCOLASTICA

1994.

Dottorato in Meccanica dei Fluidi presso l'Università "P. Sabatier", Toulouse III, Francia (menzione massima *Très Honorable*);

1987.

Laurea in Fisica - Università degli Studi di Pisa (voto 110/110).

SOFTWARE PER APPLICAZIONI MATEMATICHE

Settembre 2004:

HSL MI31. Routine in FORTRAN 90 per il Gradiente Coniugato con criteri di stopping basati sulla norma dell'energia (in collaborazione con il Dr. M. Arioli (RAL, Oxfordshire, UK)); in distribuzione da Settembre 2004 nella **collezione software HSL** (già Harwell Subroutine Library);

March 2002:

Algorithm 817 P2MESH. Libreria in C++ per l'implementazione orientata a oggetti di solutori di equazioni e sistemi di equazioni alle derivate parziali su griglie non-strutturate bidimensionali mediante elementi finiti e volumi finiti (in collaborazione col Dr. E. Bertolazzi (Università di Trento)); in distribuzione on-line da Marzo 2002 nella **Digital Library** dell'**Association for Computing Machinery (ACM)**, New York, USA.

ATTIVITÀ DI REVISIONE

(i) Revisore per le riviste scientifiche internazionali:

- Advances in Water Resources;
- Applied Mathematics and Computation;
- Applied Mathematics Letters;
- Applied Numerical Mathematics;
- Calcolo;
- Computer Methods for Applied Mechanics and Engineering;
- Computer and Physics Communications;
- Computer and Mathematics Communication;
- Computing and Visualization in Science;
- Communications on Numerical Methods in Engineering;
- Information and Software Technologies;
- International Journal for Numerical Methods in Fluids;
- Journal of Computational and Applied Mathematics;
- Mathematics and Computer in Simulation;
- Mathematical Review. - Software - Practice and Experience;
- SIAM, Journal on Scientific Computing;

(ii) Revisore della tesi della Prof.ssa F. Hubert (Université de Aix-Marseille I, Francia) *Approximation volumes finis d'équations elliptiques linéaires et non linéaires sur mailages généraux*, per il conseguimento del titolo *Habilitation a Diriger des Recherches - Discipline: Mathématiques Appliquées* presso l'Université de Aix-Marseille (Febbraio 2008).

COMUNICAZIONI A CONVEGNI E CONFERENZE

- Conferenza: *A second-order flux approximation for the mimetic finite difference method*, LANL, Los Alamos, New Mexico, USA, 13 Luglio 2009;
- Poster: *A second-order flux approximation for the mimetic finite difference approximation of diffusion problems*, co-autori: L. Beirao da Veiga e K. Lipnikov,

Workshop on Numerical Methods for Anisotropic Diffusion Problem, Porquerolles, Francia, 22-26 Giugno 2009;

- Comunicazione a convegno: *A finite volume method for solving the steady convection-diffusion equation*, Siam Conference on Mathematical and Computational Issues in the Geosciences, partecipazione su invito al minisimposio *Conservative Monotone Discretization Methods for Convection-Diffusion Problems* Leiptzig, Germania, 15-19 Giugno 2009;
- Comunicazione a convegno: *A second-order flux approximation for the mimetic finite difference method*, MAFELAP 2009, partecipazione su invito al minisimposio *Advanced Discretization Methods*, The Brunel Institute of Computational Mathematics, Brunel University, West London, UK, 9-13 Giugno 2009;
- Conferenza: *A second-order flux approximation for the mimetic finite difference method*, CMI-LATP, Università di Marseille-Provence, Francia, 7 Aprile 2009;
- Comunicazione a convegno: *The mimetic finite difference method* (invited speaker) *Finite Volumes for Complex Applications - V*, Aussois, Francia, 8-13 Giugno 2008.
- Conferenza: *The mimetic finite difference method*, MOX - Politecnico di Milano, Italia, 6 Giugno 2008.
- Conferenza: *Mimetic finite difference methods for elliptic problems*, Laboratoire de Mathématiques Jean Leray, Université de Nantes, Francia, 21 Giugno 2007.
- Seminario informale: *The mimetic finite difference method* nell'ambito del Dottorato in Matematica e Statistica presso Dipartimento di Matematica, Università di Pavia, 19 Aprile 2007.
- Seminario informale: *The mimetic finite difference method* presso il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università di Padova, 17 Aprile 2007.
- Seminario informale: *Finite volume methods* nell'ambito del Dottorato in Matematica Computazionale presso il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università di Padova, 16 Aprile 2007.
- Seminario informale: *Finite volume methods: the steady convection-diffusion equation* nell'ambito del Dottorato in Matematica Computazionale presso il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università di Padova, 16 Aprile 2007.
- Comunicazione a convegno: *Contaminant transport in porous media by a finite volume method*, IMACS/ISGG Workshop MASCOT/06, Roma, Italia, 5-7 Ottobre 2006.
- Comunicazione a convegno: *Second-order diamond-cell discretizations of elliptic and convection-dominated problems*, invited speaker *FV06: Anisotropie a Porquerolles*, Porquerolles, Francia, 14-16 Giugno 2006.
- Comunicazione a convegno: *Diagonally IMEX-RK Finite Volume Methods for Multidimensional Hyperbolic Systems*, IMACS/ISGG Workshop MASCOT-04, Firenze, Italia, 25-27 Novembre 2004.

- Comunicazione a convegno: *A mixed finite element solver for liquid-liquid impacts*, XXIX Convegno di Idraulica e costruzioni idrauliche, Trento, Italia, 7–10 Settembre 2004.
- Comunicazione a convegno: *A mixed finite element solver for liquid-liquid impacts*, Second International Conference on Fluid Structure Interaction, Cadice, Spagna, 3–5 Settembre 2003.
- Comunicazione a convegno: *Least square-based finite volumes for solving the advection-diffusion of contaminants in porous media*, IMACS/ISGG Workshop MASCOT-02, Roma, Italia, 2–4 Ottobre 2002.
- Comunicazione a convegno: *A finite volume method for transport of contaminants in porous media*, VI Congresso della Società Italiana di Matematica Applicata e Industriale, Chia Laguna, Cagliari, Italia, 27–31 Maggio 2002.
- Conferenza: *Mixed finite elements and null-space methods for the Darcy's equations*, presso CRS4, Cagliari, Italia, 12 Dicembre 2001.
- Comunicazione a convegno: *Contaminant transport in porous media by a finite volume method*, IMACS/ISGG Workshop MASCOT/01, Roma, Italia, 22–24 Ottobre 2001.
- Comunicazione a convegno: *Un algoritmo di spazio nullo per approssimazioni agli elementi finiti misti dell'equazione di Darcy*, Due giorni di Algebra Lineare Numerica, Pisa, Italia, 29–30 Maggio 2000.
- Conferenza: *P2MESH: a collection of template classes for implementing FE and FV PDE solvers on 2-D unstructured grids*, INRIA–Sophia-Antipolis, Francia, 30 Marzo 1999.
- Conferenza: *Discontinuous finite elements for diffusive problems*, CRS4, Cagliari, Italia, 9 Luglio 1999.
- Comunicazione a convegno; *Newton and quasi-Newton methods for the non-linear Richards' equation*, International Conference on Computational Methods in Water Resources XII, Creta, Grecia, 1998.

ATTIVITÀ DIDATTICA

MASTER UNIVERSITARI/SCUOLA ESTIVA

Settembre 2006.

Lectures on Finite Volume Methods in Hydrological Modelling (6 ore),
docente presso *Summer School on Advanced Numerical Modeling of Flow and Transport in Soils and Aquifers*, Centro di GeoTecnologie, S. Giovanni Valdarno, Siena, Università di Siena, 19–22 Settembre 2006.

Primo semestre, Anni Accademici 2006-2007 e 2007-2008.

Corso di Programmazione in C/C++ (60 ore),
docente del corso presso la *Scuola per le Applicazioni della Matematica nell'Industria (MAMI-SAMI)*, organizzata dall'INDAM al Dipartimento di Matematica e Applicazioni, Università degli Studi di Milano – Bicocca.

Secondo semestre, Anni Accademici dal 2002-2003 al 2007-2008.

*Corso di C++ e introduzione alla programmazione ad oggetti (36 ore),
docente del corso presso Master/Scuola per le Applicazioni della Matematica nell'Industria, organizzata dall'INdAM al Dipartimento di Matematica e Applicazioni, Università degli Studi di Milano – Bicocca.*

Secondo semestre, Anno Accademico 2001-2002.

*Corso di C++ e introduzione alla programmazione ad oggetti (18 ore),
docente del corso presso Master/Scuola per le Applicazioni della Matematica nell'Industria, organizzata dall'INdAM al Dipartimento di Matematica e Applicazioni, Università degli Studi di Milano – Bicocca.*

RESPONSABILE TESI DI MASTER

Responsabile presso l'Università di Milano-Bicocca per gli stages del Programma *Master/Scuola per le Applicazioni della Matematica nell'Industria* e realizzazione della tesi finale degli studenti:

Contini Antonio,	anno 2007,	stage presso INRIM Div. Meccanica, Torino
Lorusso Valeria,	anno 2007,	stage presso Software Company Srl, Milano
Sandonà Luca,	anno 2007,	stage presso Software Company Srl, Milano
Martelli Marco,	anno 2006,	stage presso Software Company Srl, Milano
Perez Alva,	anno 2006,	stage presso IMATI-CNR, Pavia
Sannia Francesca,	anno 2006,	stage presso Software Company Srl, Milano
Botto Lorenzo,	anno 2004,	stage presso IMATI-CNR, Pavia

CORSI UNIVERSITARI

Anni Accademici dal 2002-2003 al 2009-2010

*Corso di Calcolo Numerico,
professore a contratto per il corso di Laurea in Ingegneria dell'Ambiente e Territorio (secondo anno, primo semestre), Facoltà di Ingegneria, Università di Pavia, sede di Mantova;*

Anni Accademici dal 2002-2003 al 2009-2010

*Corso di Calcolo Numerico,
laboratorio informatico (12 ore) per il corso di Laurea in Informatica, Facoltà di Scienze, Università di Milano-Bicocca.*

Anni Accademici dal 2001-2002 al 2004-2005

*Corso di Geometria e Algebra
professore a contratto per i corsi di Laurea in Ingegneria Informatica e Ingegneria dell'Ambiente e Territorio (primo anno, primo semestre), Facoltà di Ingegneria, Università di Pavia, sede di Mantova.*

Anni Accademici dal 1998-1999 e 1999-2000

Corso di Calcolo Numerico D.U.,

professore a contratto per i corsi di Diploma Universitario in Ingegneria Informatica e Ingegneria dell'Ambiente e Territorio (primo anno, secondo semestre), Facoltà di Ingegneria, Università di Pavia.

ATTIVITÀ SCIENTIFICA - SINTESI

- 46 pubblicazioni su riviste internazionali (con peer-to-peer review), di cui due in fase di stampa;
- 1 capitolo di libro;
- 4 pubblicazioni su atti di convegno (con peer-to-peer review);
- 19 pubblicazioni su atti di convegno;
- 3 studi in fase di valutazione nell'anno 2009 per la pubblicazione su rivista internazionale;
- una libreria object-oriented in C++ per lo sviluppo di solutori di equazioni differenziali alle derivate parziali su mesh non-strutturate, in distribuzione on-line nella Digital Library di ACM;
- una routine in FORTRAN-90 per la risoluzione di sistemi di algebra lineare con matrici reali simmetriche, disponibile in HSL (Harwell Subroutine Library);
- $H\text{-index}=9$, numero di citazioni=288 (dati bibliometrici ottenuti mediante i database ISI-Web of Knowledge).

In particolare, nel corso della mia attività scientifica mi sono occupato dei seguenti temi di ricerca: ³

1. Metodi numerici per equazioni alle derivate parziali:

- metodi alle differenze finite mimetiche [?, ?, 6-8, 10, 11, 13, 48, 49, 54, 56];
- metodi ai volumi finiti [3, 14, 17, 18, 20-25, 28, 50, 55];
- metodi di tipo Galerkin discontinuo [37];
- metodi shock-capturing per sistemi iperbolici e leggi di conservazione [5, 9, 16, 34, 51];
- metodi di decomposizione di domini e multi-blocco per calcolatori con architetture parallele [12, 38, 43, 44, 47].

2. Modellizzazione numerica di problemi ingegneristici:

- Impatto liquido-liquido e liquido-solido [15, 26, 27];
- Trasporto di contaminanti in acque sotterranee e bonifica di suoli inquinati: [30, 35, 41, 42];
- Modello Black-Oil per lo studio di giacimenti petroliferi [39].

3. Sviluppo di software in FORTRAN 90 e C++ per applicazioni matematiche: [32, 33, 36, 52, 53].

4. Metodi numerici per la risoluzione di problemi di algebra lineare: [19, 29, 31].

³I riferimenti bibliografici in questa sezione sono relativi alla lista completa delle pubblicazioni.

1. Metodi numerici per equazioni alle derivate parziali.**– Metodi alle differenze finite mimetiche [1, 2, 6–8, 10, 11, 13, 48, 49, 54, 56].**

Il metodo delle differenze finite mimetiche (MFD)⁴ ha una struttura simile al metodo degli elementi finiti ma può essere utilizzato su griglie di calcolo costituite da elementi di forma molto più generale. Gli elementi, infatti, possono essere di forma poligonale in due dimensioni spaziali e poliedrica in tre, possono essere non convessi, e non è necessario che la griglia sia conforme. La differenza sostanziale con il metodo agli elementi finiti è che la formulazione dello schema MFD si basa direttamente sui gradi di libertà della discretizzazione numerica senza utilizzare esplicitamente le funzioni di base. Ciò è reso possibile definendo in modo opportuno gli operatori discreti che agiscono sui gradi di libertà e che rappresentano nella discretizzazione numerica gli operatori differenziali del problema continuo, come il gradiente, il rotore e la divergenza. Questi operatori sono riformulati nel discreto in modo da soddisfare esattamente proprietà simili a quelle degli operatori differenziali del continuo, come, per esempio, relazioni di dualità, formule di integrazione per parti, etc. Da ciò deriva l'appellativo di *schemi mimetici*.

Il punto di partenza della mia attività di ricerca in questo settore è il metodo MFD proposto nel 2005 da Brezzi, Lipnikov, e Shashkov per il problema della diffusione in forma mista.

In collaborazione con il Dr. Cangiani (attualmente presso l'Università di Milano - Bicocca, in precedenza presso l'IAC-CNR di Roma) ho sviluppato ed analizzato sia teoricamente che sperimentalmente una tecnica di post-processing [13]. Questa tecnica si basa sulla ricostruzione costante a tratti nelle celle della griglia di calcolo di un gradiente approssimato, utilizzando la soluzione numerica della variabile di flusso. La variabile scalare "ricostruita" fornisce una migliore approssimazione della soluzione esatta quando l'errore è misurato nella norma L^2 .

In collaborazione con il Dr. Cangiani e con il Prof. A. Russo (Università di Milano-Bicocca) ho esteso lo schema MFD al modello della convezione-diffusione-reazione stazionaria [8]. Sfruttando l'analogia con il metodo degli elementi finiti misti ho dimostrato teoricamente la convergenza dello schema nel regime diffusivo e ricavato le stime dell'errore di approssimazione. Le proprietà di convergenza del metodo sono state investigate anche sperimentalmente confermando l'analisi a priori. L'analogia con gli elementi finiti misti mi ha anche permesso di studiare la versione ibrida dello schema MFD basata sui moltiplicatori di Lagrange [76].

In collaborazione con il Dr. L. Beirao da Veiga (Università di Milano), ho sviluppato ulteriormente lo stimatore dell'errore locale proposto da Beirao da Veiga (2008) al caso più generale delle condizioni al bordo di tipo Dirichlet non-omogeneo e migliorato le proprietà di scaling rispetto ad eventuali discontinuità del tensore di diffusione [10]. L'analisi a posteriori ci ha permesso di dimostrare l'accuratezza e l'affidabilità del nuovo stimatore, e la sperimentazione numerica ne ha verificato la robustezza in perfetto accordo con la teoria. Inoltre, abbiamo verificato sperimentalmente l'efficacia della strategia adattiva proposta in alternativa alla strategia di raffinamento uniforme.

Il metodo MFD produce una approssimazione della soluzione del problema della diffusione in forma mista con una accuratezza del prim'ordine sia per la variabile scalare che per i flussi numerici. Su griglie di triangoli (in 2-D) e di tetraedri (in 3-D),

⁴L'acronimo è derivato dall'espressione inglese "Mimetic Finite Differences".

questa accuratezza è comparabile a quella fornita dal metodo degli elementi finiti misti di Raviart-Thomas di ordine più basso. In collaborazione con il Dr. L. Beirao da Veiga, ho proposto un metodo MFD accurato al second'ordine per i flussi numerici [11]. Per questo metodo abbiamo descritto la costruzione della matrice dei prodotti scalari locali, un aspetto cruciale nello sviluppo dei metodi MFD, abbiamo dimostrato le corrette proprietà di stabilità, e verificato la convergenza mediante sperimentazione su casi test della letteratura. Questo miglioramento nell'accuratezza vale sia per l'approssimazione della variabile vettoriale che della variabile scalare ricostruita nelle celle, qualora l'errore di approssimazione sia misurato in una norma H^1 discreta. L'analisi teorica della convergenza di questo metodo, in completo accordo con i risultati della sperimentazione numerica, è stata sviluppata in collaborazione con il Dr. Beirao da Veiga e con il Dr. Lipnikov di Los Alamos [7].

Una review di parte dei risultati che ho ottenuto in questo ambito di ricerca si trova negli atti del convegno FVCA-5 a cui ho recentemente partecipato in qualità di invited speaker [49]. Nello stesso convegno ho inoltre presentato i risultati della sperimentazione del metodo MFD applicato al benchmark su problemi di diffusione fortemente anisotropi [48].

Durante l'anno 2009 in collaborazione con il Dr. Beirao da Veiga e con il Prof. J. Droniou (Università di Montpellier) ho studiato una formulazione unificata per gli schemi alle differenze finite mimetiche e ai volumi finiti di tipo misto e ibridi applicata all'equazione di diffusione-trasporto. Infine, in collaborazione con il Dr. K. Lipnikov ed in occasione di una visita presso il Los Alamos National Laboratory di Los Alamos si è sviluppata una formulazione mimetica per il problema della magnetostatica (equazioni di Maxwell stazionarie) in forma mista di tipo *div-curl*. Entrambi questi lavori sono attualmente in valutazione per la pubblicazione su rivista internazionale.

- Metodi ai volumi finiti [3, 14, 17, 18, 20–25, 28, 50, 55].

La mia attività di ricerca in questo ambito parte dai lavori di Coudière, Vila, Ville-dieu (1999-2000), ed in particolare dallo schema cell-centered per griglie di triangoli o quadrilateri sviluppato dal Prof. Coudière nella sua tesi di dottorato (1999) presso l'Università di Tolosa. Questo schema si basa su una discretizzazione costante a tratti dell'intero gradiente della soluzione nelle cosiddette celle "diamante" (da cui il nome *diamond scheme* o *metodo a diamante*) costruite per ogni lato della griglia di calcolo in due dimensioni (per ogni faccia in tre). Il gradiente discreto così definito è poi usato per approssimare i flussi diffusivi nella formulazione ai volumi finiti, ottenuta applicando la formula di Gauss alle equazioni di convezione-diffusione in forma di divergenza con condizioni al bordo di tipo Dirichlet. Il flusso convettivo è discretizzato numericamente mediante una tecnica di upwinding, sostituendo alla variabile scalare l'incognita definita in ogni cella, che approssima la media nella cella della soluzione esatta. Lo schema numerico risultante è al prim'ordine.

In collaborazione con il Dr. Bertolazzi (Università di Trento), ho esteso al second'ordine il metodo a diamante di Coudiere [22]. Nella versione al second'ordine il flusso numerico di convezione utilizza una rappresentazione lineare a tratti della soluzione, definita localmente in ogni cella della griglia. Il second'ordine di convergenza è stato verificato sperimentalmente. In seguito, ho sviluppato con il Dr. Bertolazzi una formulazione unificata del trattamento delle condizioni al contorno [21], per garantire l'accuratezza al second'ordine anche nel caso di condizioni di tipo Neumann, Robin e misto [17].

È noto che l'incremento dell'ordine di accuratezza dell'approssimazione numerica riduce la stabilità numerica nello schema dei volumi finiti a diamante (vedi, per esempio, la monografia sui volumi finiti di Eymard-Gallouet-Herbin, 2000). Con il Dr. Bertolazzi ho quindi studiato la stabilizzazione dei termini convettivi del second'ordine mediante tecniche non lineari (slope limiters) per l'approssimazione di soluzioni con forti gradienti (layer interni e di bordo) [25, 50]. A tale scopo, abbiamo investigato sperimentalmente l'accuratezza dello schema ai volumi finiti incorporando nella formulazione numerica vari tipi di slope limiter, tra cui quelli proposti in letteratura da Barth-Jespersen (1990), Wierse (1997) e Hubbard (1999). Inoltre, abbiamo proposto una nuova formulazione di tipo non lineare per il calcolo dei gradienti nelle celle diamante [20], che permette di dimostrare teoricamente l'esistenza di un Principio di Massimo per la soluzione numerica. Abbiamo verificato sperimentalmente l'efficacia di questa formulazione rispetto allo schema originale, che invece non garantisce principi di massimo o di minimo. In particolare, abbiamo osservato che le soluzioni numeriche prodotte dallo schema non lineare mostrano una violazione del Principio di Massimo comparabile con la precisione di macchina in problemi test rappresentativi. Negli stessi problemi test, lo schema lineare produce violazioni del Principio di Massimo comparabili con l'errore di approssimazione della soluzione numerica. Questo miglioramento richiede un incremento del costo computazionale non superiore al 10 – 15% rispetto al calcolo eseguito con lo schema originale. I risultati prodotti in questa linea di ricerca sono stati presentati nel 2008 al minisimposio (partecipazione su invito) *Conservative Monotone Discretization Methods for Convection-Diffusion Problems* del convegno *SIAM Conference on Mathematical and Computational Issues in the Geosciences*.

Per applicare lo schema a diamante a modelli di trasporto e diffusione di contaminanti in mezzi porosi, ho esteso il metodo a volumi finiti, originariamente formulato per problemi stazionari, a problemi dipendenti dal tempo [23, 24]. In collaborazione con il Prof. Ferraris (Università di Torino), ho anche adattato lo schema a diamante al calcolo di flussi sotterranei in suoli parzialmente saturi [28]. In questo lavoro, il metodo ai volumi finiti è stato utilizzato per la discretizzazione numerica dell'equazione di Richards dipendente dal tempo nella formulazione head-based mass-conservative di Celia (1990) e Celia e Binning (1993).

In collaborazione con il Prof. Putti (Università di Padova), ho studiato l'effetto di *mesh locking* quando il metodo dei volumi finiti al second'ordine è applicato alla risoluzione numerica di problemi di diffusione fortemente anisotropi [18]. Lo schema si è rivelato robusto in accordo con la definizione proposta da Babuska-Suri (1982), anche se nel caso di problemi con condizioni di bordo di tipo Neumann appare un effetto di locking della convergenza nei casi di forte anisotropia. La sperimentazione numerica ci ha permesso di identificare una possibile legge fenomenologica che regola questo effetto: l'effetto di locking scompare e il metodo raggiunge l'ordine ottimale di convergenza quando nel processo di raffinamento delle griglie il quadrato del passo di griglia diviene comparabile o inferiore al rapporto di anisotropia. Segnaliamo che il caso test da noi considerato in [18] è stato scelto dagli organizzatori della conferenza internazionale FVCA-5 per il benchmark sulla risoluzione numerica di problemi di diffusione fortemente anisotropa; vedi anche Referenza [48].

In collaborazione con il Prof. A. Russo (Università di Milano-Bicocca), ho successivamente esteso la tecnica dei volumi finiti a diamante per problemi di convezione-diffusione stazionari a griglie poligonali con elementi di forma più generale [14]. In questo lavoro, abbiamo studiato come stabilizzare lo schema nel regime a convezione

dominante, introducendo nella formulazione numerica un termine dipendente dal residuo simile al termine di stabilizzazione di tipo SUPG. Lo schema così ottenuto non necessita degli slope limiters, che, in alcuni casi, possono deteriorare la qualità della soluzione o addirittura ridurre l'ordine di convergenza del metodo. Questo schema si è dimostrato stabile nel calcolo di soluzioni caratterizzate da forti layers di bordo ed interni ed accurato al second'ordine lontano da queste zone critiche.

Infine, in collaborazione con il Prof. Coudière (Università di Nantes), ho riformulato lo schema a diamante al second'ordine per problemi di convezione-diffusione stazionaria nell'ambito dei metodi Discrete Duality Finite Volume (DDFV). Nei metodi DDFV, proposti in una serie di lavori recenti da Hermeline (2000-2001) e Domelevo-Omnes (2005), i valori nodali, usati per la costruzione dei gradienti approssimati nelle celle diamante, sono considerati come incognite al pari delle variabili che rappresentano il valore della soluzione nei baricentri delle celle. In [3], ho sfruttato il gradiente numerico della formulazione DDFV per l'approssimazione al second'ordine dei flussi convettivi. Attraverso l'analisi a priori, ho dimostrato la convergenza del metodo e con la sperimentazione numerica le buone proprietà di approssimazione di questa tecnica.

In collaborazione con la Dr. S. Krell (Università di Marseille-Provence) ho sviluppato e analizzato teoricamente uno schema di tipo DDFV per il problema di Stokes stazionario tri-dimensionale. In particolare, ho dimostrato l'esistenza, l'unicità e la stabilità della soluzione numerica, la convergenza dell'approssimazione ed ho ottenuto le stime dell'errore sia nelle norme discrete dipendenti dalla mesh che nelle norme degli spazi funzionali in cui è posto il problema del continuo. I risultati di questo lavoro sono contenuti in un articolo attualmente in valutazione per la pubblicazione su rivista internazionale [55].

- Metodi di tipo Galerkin discontinuo per problemi ellittici [37].

In collaborazione con i Proff. Brezzi e Marini (Università di Pavia), con la Dr. Pietra (*IMATI-CNR*) e con il Prof. A. Russo (Università di Milano-Bicocca), ho partecipato allo studio di un metodo discretizzazione numerica agli elementi finiti di tipo Galerkin discontinuo per problemi ellittici. Questo metodo si basa su una tecnica proposta da Bassi-Rebay (1996-1998) per il trattamento dei termini viscosi nelle equazioni di Navier-Stokes comprimibile. Inoltre, abbiamo proposto una variante dello schema di Bassi-Rebay che sfrutta la penalizzazione dei salti della soluzione approssimata alle interfacce delle celle della griglia per stabilizzare il metodo numerico. L'analisi a priori ha mostrato la convergenza della soluzione approssimata alla soluzione esatta e l'ottimalità dello schema.

- Metodi shock-capturing per sistemi iperbolici e leggi di conservazione [5, 9, 16, 34, 51].

In collaborazione con il Dr. E. Bertolazzi (Università di Trento), ho sviluppato un metodo ai volumi finiti basato sul blending di flussi numerici del primo e del second'ordine per il calcolo di flussi ipersonici reattivi [34]. Il metodo ai volumi finiti è stato inizialmente formulato su griglie non-strutturate per flussi ipersonici comprimibili e reattivi sia stazionari che evolutivi in tempo, estendendo così lo schema precedentemente sviluppato per griglie strutturate dal Dr. Bertolazzi durante la sua tesi di dottorato (Trento, 1995). Il modello matematico considerato in questo lavoro accoppia le equazioni di Eulero comprimibile con i modelli termodinamici di Park (1984) e Candler (1988). Lo schema proposto si inquadra nell'ambito degli schemi flux-splitting alla

Steger-Warming (1981) per flussi chimicamente reattivi secondo la generalizzazione di Liu-Vinokur (1988) ed è alternativo alla generalizzazione del Riemann Solver di Osher proposta da Abgrall, Fezoui, Talandier (1992). La tecnica di integrazione numerica prevede un disaccoppiamento alla Gauss-Seidel delle equazioni non lineari del modello in esame, la cui risoluzione si effettua tramite un metodo iterativo di punto fisso. Lo schema numerico è efficiente computazionalmente perché non richiede né il calcolo di matrici jacobiane come nella formulazione di Liu-Vinokur, né il calcolo della soluzione approssimata di un problema di Riemann con chimica reattiva come nel metodo di Abgrall, Fezoui, Talandier. L'analisi dell'operatore discreto nel contesto delle M-matrici ci ha permesso di dimostrare teoricamente l'esistenza di un Principio di Massimo per l'approssimazione numerica della soluzione. Da questa proprietà, si ricava la positività dei valori approssimanti la densità delle specie chimiche, estendendo così i risultati di positività ottenuti da Larroutourou (1991) per gli algoritmi di integrazione numerica basati su solutori di problemi di Riemann tipo Abgrall, Fezoui, Talandier. Questo metodo è stato successivamente riformulato utilizzando tecniche di avanzamento in tempo di tipo Diagonal IMPLICIT-EXPLICIT (DIMEX) Runge-Kutta. La nuova formulazione mantiene le proprietà di positività della precedente, ma si è dimostrata computazionalmente più accurata ed efficiente [16, 51].

In due studi a singolo autore ho sviluppato metodi originali di tipo shock-capturing per la risoluzione numerica di leggi di conservazione e sistemi iperbolici.

Nel primo studio [5], ho proposto una variante originale ai minimi quadrati delle ricostruzioni ENO sulle primitive e mediante deconvoluzione di Harten, Engquist, Osher, Chakravarthy (1986-1987) e Shu, Osher (1987-1988). La ricostruzione polinomiale utilizza dei pesi non-lineari dipendenti dalla soluzione numerica e garantisce la conservazione della media della soluzione numerica a meno dell'errore formale dello schema di approssimazione. In questo studio, ho dimostrato teoricamente le proprietà di consistenza e TVD della tecnica di ricostruzione. L'ibridazione di questo algoritmo di ricostruzione polinomiale con l'utilizzo di un polinomio simmetrico rispetto allo stencil di interpolazione (schema centrale) rende possibile ottenere una tecnica di interpolazione polinomiale al contempo accurata, non-oscillante ed efficiente dal punto di vista computazionale. L'utilizzo di questa nuova strategia di interpolazione per schemi in tempo di tipo TVD/TVB Runge-Kutta alla Shu (1987,1988) e Gottlieb, Shu, Tadmor (2001) permette la realizzazione di metodi shock-capturing di ordine formale elevato per leggi di conservazione multi-dimensionali. La sperimentazione numerica effettuata su problemi in una e due dimensioni spaziali mostra il raggiungimento dell'ordine formale previsto dall'analisi teorica dell'errore di troncamento della ricostruzione. Essa conferma inoltre le buone proprietà shock-capturing degli algoritmi risultanti.

Nel secondo studio [9], ho sviluppato un'algoritmo di calcolo, per leggi di conservazione scalari con termini di sorgente reattiva stiff, basato su una rappresentazione lineare a tratti di tipo MUSCL-TVD alla Van Leer (1974) ed Osher (1985) della soluzione. Il metodo estende ai volumi finiti di tipo cell-centered l'idea della discretizzazione spaziale di tipo Galerkin discontinuo e shock-capturing di Cockburn-Shu (1987-2004) per le leggi di conservazione. Formulando un opportuno set di equazioni per tutti i gradi di libertà discreti (medie e pendenze approssimate nelle celle), si ottiene uno schema numerico formalmente accurato al second'ordine. L'aspetto innovativo del procedimento consiste nel fatto che non è più necessario operare la ricostruzione dei gradienti approssimati dalle medie nelle celle, come invece nella formulazione usuale dei volumi finiti cell-centered al second'ordine. I termini di sorgente stiff sono trattati numeri-

camente utilizzando lo schema di discretizzazione temporale implicito-esplicito BDF2 proposto da Hundsdorfer (2001) e Hundsdorfer e Jaffré (2003). In questo studio, ho dimostrato teoricamente la consistenza del metodo e, nel caso lineare, la convergenza della soluzione approssimata alla soluzione esatta. La sperimentazione numerica è in accordo con le proprietà di approssimazione previste teoricamente.

- Solutori numerici multi-blocco per calcolatori con architetture parallele e metodi di decomposizione di domini [12, 38, 43, 44, 47].

Nel corso della ricerca, iniziata al *CERFACS* durante la mia tesi di dottorato, ho sviluppato un metodo ai volumi finiti *cell-centered* per la risoluzione numerica delle equazioni di *Eulero* e *Navier-Stokes comprimibile* su griglie di calcolo strutturate. Questo metodo accoppia una tecnica di discretizzazione centrale alla Turkel e Swanson (1986-1992) per i termini viscosi (quando sono presenti) con uno schema numerico alla Godunov per i termini non-viscosi della equazione. Le proprietà di alta risoluzione spaziale e stabilità non lineare in presenza di shock sono ottenute per mezzo di una ricostruzione polinomiale a tratti lineare o di grado più elevato di tipo *ENO* (Essenzialmente Non-Oscillante) alla Harten, Engquist, Osher, Chakravarthy (1986-1987) o di tipo *MUSCL-TVD* alla Osher (1988). La formulazione dell'algoritmo di calcolo per griglie strutturate di tipo multiblocco [44] ha reso possibile l'implementazione efficiente sulle macchine parallele a memoria condivisa (Alliant FX/80, Cray 2, Cray YMP), macchine a memoria virtualmente condivisa (BBN 2000) e network di stazioni comunicanti per mezzo di librerie di message passing (*PVM*, *MPI*) all'epoca disponibili al *CERFACS*.

Al *CRS4* ho successivamente considerato la tecnica delle griglie multiblocco per le equazioni di *Navier-Stokes comprimibile* usate nella modellizzazione numerica di flussi comprimibili laminari e turbolenti ad alti numeri di Reynolds in due e tre dimensioni. In collaborazione con il Dr. Stolcis (Centro Ricerche Fiat) [38, 47] ho caratterizzato l'efficienza raggiungibile dalla formulazione su griglie multiblocco attraverso l'implementazione su macchine a memoria distribuita e su cluster di processori RISC. Inoltre, in [43] ho investigato l'efficienza della formulazione multiblocco nella risoluzione numerica di modelli di flusso e trasporto in mezzi porosi.

Un approccio diverso è stato seguito in un lavoro di recente pubblicazione sulla decomposizione di domini che ho condotto in collaborazione con la Dr. Bertoluzza (*IMATI-CNR*) e con la Dr. Falletta (Università di Torino) [12]. In questo lavoro abbiamo considerato una classe di schemi di stabilizzazione di tipo "residual-based" nell'ambito della formulazione *three-fields* (Baiocchi, Brezzi, Marini, 1992), includendo il metodo *wavelet* di Bertoluzza-Kunoth (2000). In questo lavoro, ho dimostrato sperimentalmente come sia possibile sfruttare l'approccio *three-fields* per ottenere un accoppiamento efficiente dei sotto-domini senza modificare direttamente l'algoritmo di risoluzione, e quindi il solutore, di ogni singolo sottodominio. Questo risultato rende particolarmente attraente questa tecnica per le applicazioni al calcolo parallelo.

2. Modellizzazione numerica di problemi ingegneristici.

- Impatto liquido-liquido e liquido-solido [15, 26, 27].

In collaborazione con il Dr. E. Bertolazzi e con il Prof. F. Trivellato (Università di Trento), ho partecipato allo sviluppo di un modello numerico basato sul flusso potenziale. Il modello risolve il problema dell'evoluzione della superficie libera di interfaccia tra liquido ed aria su griglie evolutive in tempo ed è stato considerato per investigare

fenomeni di impatto di jet liquidi su superfici solide verticali e su superfici liquide a riposo. Queste problematiche hanno applicazioni importanti nel settore ingegneristico della progettazione di dighe e strutture foranee e frangi-flutti. Il modello è stato validato sia riproducendo i risultati dei casi test della letteratura presentati da Prosperetti e Oguz (1990,1995,1997) che per confronto con i dati sperimentali di Scotton (1996), e Trivellato e Scotton (2001).

- Trasporto di contaminanti in acque sotterranee e bonifica di suoli inquinati [30, 35, 41, 42].

In collaborazione con il Dr. Gallo (CRS4), ho sviluppato un modello accoppiato per flusso saturo/non-saturo e trasporto multi-componente di contaminanti in mezzi porosi eterogenei. Lo studio di questo modello è stato finalizzato allo sviluppo di un simulatore numerico per definire le migliori strategie di intervento nella riduzione per via batterica del livello di inquinanti in suoli contaminati da idrocarburi. Il modello matematico prevede l'accoppiamento delle equazioni di flusso multi-fase e trasporto multi-componente con sistemi di equazioni di crescita di colonie batteriche. In particolare sono stati presi in considerazione i modelli multi-specie di crescita batterica proposti in vari lavori da Molz, Widdowson e Benefield (1986-1988) e ripresi successivamente da Malone et.al. (1993) e Wood et.al. (1994-1995). Dal punto di vista numerico, ho studiato l'accoppiamento di metodi di risoluzione numerica ad elementi finiti misti (Raviart-Thomas, Brezzi-Douglas-Marini di ordine più basso) per le equazioni del modello di flusso multi-fase e ai volumi finiti di tipo cell-centered alla Barth-Jespersen (1989-1990) per il modello di trasporto multi-componente.

- Modello Black-Oil per lo studio di giacimenti petroliferi [39].

In collaborazione con il Dr. Mantica (Gruppo Ricerca Giacimenti, Agip) e con il Prof. Bergamaschi (Università di Padova) ho sviluppato una formulazione numerica per mesh non-strutturate del modello Black Oil di Bell-Trangenstein (1986-1990), che è usato in AGIP allo studio dei fenomeni connessi col "secondary oil recovery". Il modello di Bell-Trangenstein prevede l'accoppiamento di un'equazione parabolica dipendente dal tempo per la pressione e per la velocità totale con un set di leggi di conservazione per le componenti multifase che formano un sistema di equazioni iperboliche. La formulazione numerica è stata realizzata utilizzando elementi finiti di tipo misto/misto-ibrido (Raviart-Thomas, Brezzi-Douglas-Marini) per l'equazione ellittica (parabolica) e volumi finiti per il sistema iperbolico (Colella, 1990). La sperimentazione ha mostrato l'efficacia dello schema numerico sviluppato.

3. Sviluppo di software in FORTRAN 90 e C++ per applicazioni matematiche.

- P2MESH [32, 36].

In collaborazione con il Dr. E. Bertolazzi, Università di Trento, la libreria software P2MESH per la progettazione *object-oriented* e l'implementazione in C++ di solutori di equazioni alle derivate parziali basati su elementi finiti, volumi finiti e differenze finite mimetiche su griglie non strutturate. Il software è stato realizzato utilizzando il *Barton-Nackman's trick* (1994), coerentemente con l'idea di Furnish (1998), nell'ambito delle tecniche di *generic programming* sviluppate da Musser e Stepanov (1994) per il design della Standard Template Library del C++ (1996). L'architettura della libreria è descritta in due pubblicazioni su riviste internazionali [32, 36]. Corredato di manuali d'uso e

tutoring [83–86], e dopo revisione scientifica indipendente da parte dell'Association for Computing Machinery (ACM), la libreria software è ufficialmente in distribuzione da Marzo 2002 nella ACM-Digital Library.

– **HSL_MI31 [52, 53].**

In collaborazione con il Dr. Arioli (*RAL*), ho sviluppato la routine HSL_MI31 [53], che implementa nel linguaggio *FORTRAN 90* un algoritmo di tipo gradiente coniugato con tecniche di arresto delle iterazioni basate sugli estimatori a posteriori dell'errore misurato nella norma dell'energia. La routine è progettata utilizzando la tecnica della *reverse communication*, ed è in distribuzione da Settembre 2004 nella libreria software *HSL* [52].

– **Interfaccia object-oriented per vettori-matrici sparse [33].**

In collaborazione con il Dr. S. Mazet (Silvaco Int., Grenoble), ho sviluppato una interfaccia object oriented nello stile di programmazione a template del linguaggio C++ per trattare in modo efficiente matrici e vettori sparsi ed operatori lineari discreti con strutture interne. La progettazione di questo software è stata oggetto di pubblicazione su rivista internazionale [33].

4. Metodi numerici per la risoluzione di problemi di algebra lineare [19, 29, 31].

L'attività di ricerca inerente questa sezione è stata condotta principalmente in collaborazione con il Dr. M. Arioli presso il *RAL*. In particolare, ho lavorato sulle due seguenti tematiche.

– *Studio di tecniche di spazio nullo per la risoluzione di sistemi lineari.*

Ho studiato la tecnica di spazio nullo per migliorare l'efficienza computazionale nella risoluzione dei problemi lineari originati dalla discretizzazione dell'equazione di Darcy stazionaria con gli elementi finiti misti alla Raviart-Thomas. L'utilizzo di tecniche di network programming secondo l'idea proposta da Arioli-Baldini (2001) permette di calcolare formalmente (senza operazioni floating-point) lo spazio nullo dell'operatore matriciale che deriva dalla discretizzazione alla Raviart-Thomas [19, 29, 31].

– *Studio sperimentale di criteri d'arresto per il gradiente coniugato pre-condizionato.*

Ho condotto uno studio sperimentale degli stimatori d'errore a posteriori nella norma dell'energia di Golub e Meurant (1997), Meurant (1999), e Strakos e Tichy (2002). La ricerca ha reso possibile il miglioramento dei criteri di arresto per l'algoritmo iterativo del gradiente coniugato pre-condizionato applicato alla risoluzione di sistemi lineari con matrici reali simmetriche sparse di grandi dimensioni [53]. Questo studio ha permesso la realizzazione della routine HSL_MI31 (vedi Referenza [52]), che è in distribuzione da settembre 2004 nella libreria software *HSL*.

Gianmarco Manzini - Lista Completa delle Pubblicazioni

PUBBLICAZIONI SU RIVISTA INTERNAZIONALE

1. L. Beirão da Veiga, J. Droniou, and G. Manzini. A unified approach to handle convection term in finite volumes and mimetic discretization methods for elliptic problems., 2010. Accepted for publication in *IMA J. Numer. Anal.*
2. A. Cangiani, F. Gardini, and G. Manzini. Convergence of the mimetic finite difference method for eigenvalue problems in mixed form, 2010. To Appear in *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Available online since 12 June 2010 at <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2010.06.011>.
3. Y. Coudière and G. Manzini. The discrete duality finite volume method for convection-diffusion problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 47(6):4163–4192, 2010.
4. A. Lovison, G. Manzini, A. Maritan, A. Rinaldo, and M. Putti. Spanning trace-routes over modular network and general scaling degree distributions. *Physical Review E.*, 81(036105), 2010.
5. G. Manzini. An efficient and conservative hybrid method for solving multi-dimensional conservation laws. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 25(5):1029–1066, 2009.
6. L. Beirão da Veiga, V. Gyrya, K. Lipnikov, and G. Manzini. Mimetic finite difference method for the stokes problem on polygonal meshes. *J. Comput. Phys.*, 228(19):7215–7232, 2009.
7. L. Beirão da Veiga, K. Lipnikov, and G. Manzini. Convergence analysis of the high-order mimetic finite difference method. *Numerische Mathematik*, 113(3):325–356, 2009.
8. A. Cangiani, G. Manzini, and A. Russo. Convergence analysis of a mimetic finite difference method for general second-order elliptic problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 47(4):2612–2637, 2009.
9. G. Manzini. An implicit-explicit finite volume scheme for 1-D convection-reaction equations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79:2403–2428, 2009.
10. L. Beirão da Veiga and G. Manzini. An a-posteriori error estimator for the mimetic finite difference approximation of elliptic problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 76(11):1696–1723, 2008.
11. L. Beirão da Veiga and G. Manzini. A higher-order formulation of the mimetic finite difference method. *SIAM, J. Sci. Comput.*, 31(1):732–760, 2008.
12. S. Bertoluzza, S. Falletta, and G. Manzini. Efficient design of residual-based stabilization techniques for the three fields domain decomposition method. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 18(7):973–999, 2008.
13. A. Cangiani and G. Manzini. Flux reconstruction and solution post-processing in mimetic finite difference methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(9-12):933–945, 2008.

14. G. Manzini and A. Russo. A finite volume method for advection-diffusion problems in convection-dominated regimes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(13-16):1242–1261, 2008.
15. E. Bertolazzi and G. Manzini. Computer modeling of liquid-solid impacts. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(1-2):162–176, 2007.
16. E. Bertolazzi and G. Manzini. DIMEX Runge-Kutta finite volume methods for multidimensional hyperbolic systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 75(5-6):141–160, 2007.
17. E. Bertolazzi and G. Manzini. On vertex reconstructions for cell-centered finite volume approximations of 2D anisotropic diffusion problems. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 17(1):1–32, 2007.
18. G. Manzini and M. Putti. Mesh locking effects in the finite volume solution of 2-D anisotropic diffusion equations. *Journal of Computational Physics*, 220(2):751–771, 2007.
19. M. Arioli and G. Manzini. A network programming approach in solving Darcy's equation by mixed finite element methods. *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, 22:41–70, 2006.
20. E. Bertolazzi and G. Manzini. A second-order maximum principle preserving finite volume method for steady convection-diffusion problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 43(5):2172–2199, 2005.
21. E. Bertolazzi and G. Manzini. A unified treatment of boundary conditions in least square-based finite volume methods. *Computer & Mathematics with Applications*, 49(11-12):1755–1765, 2005.
22. E. Bertolazzi and G. Manzini. A cell-centered second-order accurate finite volume method for convection-diffusion problems on unstructured meshes. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 14(8):1235–1260, 2004.
23. E. Bertolazzi and G. Manzini. A finite volume method for transport of contaminants in porous media. *Applied Numerical Mathematics*, 49(3-4):291–305, 2004.
24. E. Bertolazzi and G. Manzini. Least square-based finite volumes for solving the advection-diffusion of contaminants in porous media. *Applied Numerical Mathematics*, 51(4):451–461, 2004.
25. E. Bertolazzi and G. Manzini. Limiting strategies for polynomial reconstructions in the finite volume approximation of the linear advection equation. *Applied Numerical Mathematics*, 49(3-4):277–289, 2004.
26. E. Bertolazzi and G. Manzini. A mixed finite element solver for liquid-liquid impacts. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 20(8):595–606, 2004.
27. E. Bertolazzi and G. Manzini. A finite volume method for the numerical simulation of liquid bore impact against wall. *Far East Journal of Applied Mathematics*, 14(2):221–241, 2004.

28. G. Manzini and S. Ferraris. Mass-conservative finite volume methods on 2-D unstructured grids for the Richards' equation. *Advances in Water Resources*, 27(12):1199–1215, 2004.
29. M. Arioli and G. Manzini. Null space algorithm and spanning trees in solving Darcy's equation. *BIT Numerical Mathematics*, 43(5):839–848, 2003.
30. C. Gallo and G. Manzini. Finite volume/mixed finite element analysis of pollutant transport and bioremediation in heterogeneous saturated aquifers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 42(1):1–21, 2003.
31. M. Arioli and G. Manzini. A null space algorithm for mixed finite-element approximations of Darcy's equation. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 18(9):645–657, 2002.
32. E. Bertolazzi and G. Manzini. Algorithm 817 P2MESH: generic object-oriented interface between 2-D unstructured meshes and FEM/FVM-based PDE solvers. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 28(1):101–131, 2002.
33. G. Manzini and S. Mazet. An object-oriented interface for the dynamic memory management of sparse discrete mathematical operators in numerical scientific applications. *Software – Practice and Experience*, 32(7):621–644, 2002.
34. E. Bertolazzi and G. Manzini. A triangle-based unstructured finite-volume method for chemically reactive hypersonic flows. *Journal of Computational Physics*, 166(1):84–115, 2001.
35. C. Gallo and G. Manzini. A fully coupled numerical model for two-phase flow with contaminant transport and biodegradation kinetics. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 17(5):325–336, 2001.
36. E. Bertolazzi and G. Manzini. P2MESH: an extensible set of generic classes for PDE solvers on 2-D unstructured meshes. *Annali dell'Università di Ferrara. Nuova Serie. Sezione VII. Scienze Matematiche*, 46:203–214, 2000.
37. F. Brezzi, G. Manzini, D. Marini, P. Pietra, and A. Russo. Discontinuous Galerkin approximations for elliptic problems. *Numerical Methods for Partial Differential Equations. An International Journal*, 16(4):365–378, 2000.
38. G. Manzini and L. Stolcis. Distributed parallel strategies for industrial CFD solvers: a case study and analysis of performances. *Journal for Parallel and Distributed Computing*, 57(3):334–344, 1999.
39. L. Bergamaschi, S. Mantica, and G. Manzini. A mixed finite element–finite volume formulation of the black-oil model. *SIAM, Journal on Scientific Computing*, 20(3):970–997, 1998.
40. C. Fassino and G. Manzini. Fast-secant algorithms for the non-linear Richards' equation. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 14(10):921–930, 1998.
41. C. Gallo and G. Manzini. 2-D numerical modeling of bioremediation in heterogeneous saturated soils. *Transport in Porous Media*, 31(1):67–88, 1998.

42. C. Gallo and G. Manzini. A mixed finite element/finite volume approach for solving biodegradation transport in groundwater. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26(5):533–556, 1998.
43. C. Vittoli, P. Wilders, M. Manzini, and G. Fotia. Distributed parallel computation of 2-D miscible transport with multi-domain implicit time integration. *Simulation-Practice and Theory*, 6(1):71–88, 1998.
44. L. Giraud and G. Manzini. Parallel implementations of 2-D explicit Euler solvers. *Journal of Computational Physics*, 123(1):111–118, 1996.
45. A. Quarteroni, D. Ambrosi, L. Formaggia, G. Fotia, G. Manzini, M. Mulas, and L. Stolicis. Modeling and simulation in computational fluid dynamics at CRS4. *IEEE – Computational Science and Engineering*, 3(3):4–8, 1996.
46. G. Manzini, A. Ticca, and G. Zanetti. Interactive books. *International Journal of Modern Physics C*, 5(5):785–790, 1994.

CAPITOLO DI LIBRO

47. G. Manzini and L. Stolicis. Distributed parallel strategies for industrial CFD solvers. In H. Power, editor, *High-Performance Computing Vol.3 - Algorithms and Applications of Parallel Computing*. Computational Mechanics Publications, Southampton – UK, 1998.

ATTI DI CONVEGNI INTERNAZIONALI (CON COMITATO DI LETTURA)

48. G. Manzini. The mimetic finite difference method. Benchmark on anisotropic problems. In R. Eymard and Hérard J.-M., editors, *Finite Volumes for Complex Applications V, Problems and Perspectives*, pages 865–878. Wiley, 2008.
49. G. Manzini. The mimetic finite difference method (invited). In R. Eymard and Hérard J.-M., editors, *Finite Volumes for Complex Applications V, Problems and Perspectives*, pages 119–134. Wiley, 2008.
50. E. Bertolazzi and G. Manzini. Polynomial reconstructions and limiting strategies in finite volume approximations. In R. Herbin and D. Kroner, editors, *Finite Volumes for Complex Applications III, Problems and Perspectives*, pages 285–292. Hermes Penton Science, 2002.
51. E. Bertolazzi and G. Manzini. High-order IMEX-RK finite volume methods for multidimensional hyperbolic systems. In F. Brezzi and et al., editors, *Proceedings ENUMATH 2001, the Fourth European Conference on Numerical Mathematics and Advanced Applications*, pages 35–44, Ischia, July 23-28 2001. Springer.

SOFTWARE

52. M. Arioli and G. Manzini. HSL_MI31 – Package Specification. In *HSL Release 2004*. Computational Centre and Engineering Department, Atlas Centre, Rutherford Appleton Laboratory, CCLRC, Oxon, UK.

53. M. Arioli and G. Manzini. MI31: a conjugate gradient algorithm implementation with energy-norm stopping criteria. Pubblicazione RAL-TR-2005-004, Computational Centre and Engineering Department, Atlas Centre, Rutherford Appleton Laboratory, CCRLC, Oxon, Uk, March 2005.

ARTICOLI IN FASE DI VALUTAZIONE

54. L. Beirão da Veiga, K. Lipnikov, and G. Manzini. The mimetic finite difference method for steady Stokes problems on polyhedral meshes. Pubblicazione 6PV09/5/0, IMATI-CNR, 2009. (also Los Alamos Report LAUR 09-00753). In esame per la pubblicazione su SIAM J. Numer. Anal.
55. S. Krell and G. Manzini. The discrete duality finite volume method for the Stokes equation on 3D polyhedral meshes. Pubblicazione 29PV09/22/0, IMATI-CNR, 2009. In esame per la pubblicazione su Numer. Math.
56. K. Lipnikov, G. Manzini, F. Brezzi, and A. Buffa. The mimetic finite difference method for 3D magnetostatics fields problems. Pubblicazione 31PV09/24/0, IMATI-CNR, 2009. In esame per la pubblicazione su J. Comput. Phys.

ATTI DI CONVEGNI INTERNAZIONALI

57. E. Bertolazzi, G. Manzini, and F. Trivellato. A mixed finite element solver for liquid-liquid impacts. In *XXIX Convegno di Idraulica e costruzioni idrauliche*, pages 1–9. Università degli Studi di Trento, 7–10 September 2004. Tech. Report IMATI-14-PV.
58. E. Bertolazzi and G. Manzini. Least square-based finite volumes for solving the advection-diffusion of contaminants in porous media. In R. M. Spitaleri and F. Pistella, editors, *Proceedings of the IMACS/ISGG Workshop MASCOT/02*, pages 45–54, Roma, 2003.
59. G. Manzini. A mixed finite element solver for liquid-solid and liquid-liquid impacts. In S. K. Chakrabarti, C. A. Brebbia, D. Almorza, and R. Gonzalez-Palma, editors, *Fluid Structure Interaction II*, pages 63–72, Southampton, UK, 2003. WIT Press.
60. E. Bertolazzi, C. Gallo, and G. Manzini. A finite volume method for transport of contaminants in porous media. In *VI Congresso della Società Italiana di Matematica Applicata e Industriale, Proceedings CD ROM*. SIMAI, 2002.
61. E. Bertolazzi and G. Manzini. Contaminant transport in porous media by a finite volume method. In R. M. Spitaleri and F. Pistella, editors, *Proceedings of the IMACS/ISGG Workshop MASCOT/01*, pages 17–24, Roma, 2002.
62. E. Bertolazzi and G. Manzini. IMEX-RK finite volume methods for multi-dimensional hyperbolic systems. In *VI Congresso della Società Italiana di Matematica Applicata e Industriale, Proceedings CD ROM*. SIMAI, 2002.
63. E. Bertolazzi and G. Manzini. Limiting strategies for polynomial reconstructions in finite volume approximations of the linear advection equation. In R. M. Spitaleri and F. Pistella, editors, *Proceedings of the IMACS/ISGG Workshop MASCOT/01*, pages 9–16, Roma, 2002.

64. M. Arioli and G. Manzini. Null space algorithms for solving augmented systems arising in the mixed finite element approximation of saddle point problems. In N. Mastorakis, editor, *CSCC 2000-MCME 2000-MCPE 2000 Proceedings, Book 1: Problems in Modern Applied Mathematics*, pages 2851–2856. WSES Press, 2000.
65. F. Brezzi, G. Manzini, D. Marini, P. Pietra, and A. Russo. Discontinuous Galerkin approximations for elliptic problems. In *F. Brioschi, Convegno di Studi Matematici, 22/23 ottobre 1997, Incontro N. 16*, pages 197–217. Istituto Lombardo – Accademia di Scienze e Lettere, Milano, 1999.
66. C. Fassino and G. Manzini. Newton and quasi-Newton methods for the non-linear Richards’ equation. In *International Conference on Computational Methods in Water Resources XII, Crete, Greece, 1998*, Southampton – UK, 1998. Computational Mechanics Publications.
67. S. Ferraris, G. Carrà, C. Gallo, and G. Manzini. Rill erosion on a sandy soil: preliminary field experiment and quasi-3D numerical simulation. In W. Summer et al, editor, *IAHS European Conference on Modeling Soil Erosion Sediment Transp. and Closely Related Hydrological Processes*, number 249 in IAHS, pages 45–51, Vienna, 1998.
68. A. Cominelli, P. Consonni, S. Mantica, and G. Manzini. High-order mixed finite element/TVD finite volume schemes for Black-Oil simulations. In *V European Conference of Mathematics in Oil Recovery*, 1996.
69. C. Gallo and G. Manzini. Modeling transport and biodegradation of nitrates using a mixed finite element-finite volume approach. In A. A. Aldama, J. Aparicio, I. Herrera, C. A. Brebbia, W. G. Gray, and G. F. Pinder, editors, *International Conference on Computational Methods in Water Resources XI, Cancun, Mexico, 1996*, pages 169–176, Southampton, UK, 1996. Computational Mechanics Publications.
70. L. Bergamaschi, C. Gallo, G. Manzini, C. Paniconi, and M. Putti. A mixed finite element/TVD finite volume scheme for saturated flow and transport in groundwater. In M. M. Cecchi, K. Morgan, J. Periaux, B. A. Schrefler, and O. C. Zienkiewicz, editors, *Proc. of the Ninth International Conference on Finite Elements in Fluids: New Trends and Applications, Part II*, pages 1223–1232, Venice, Italy, 1995. Dipartimento di Matematica Pura ed Applicata, Università di Padova,.
71. L. Bergamaschi, S. Mantica, and G. Manzini. A mixed finite element/finite volume approach for reservoir simulation. In M. M. Cecchi, K. Morgan, J. Periaux, B. A. Schrefler, and O. C. Zienkiewicz, editors, *Proc. of the Ninth International Conference on Finite Elements in Fluids: New Trends and Applications, Part II*, pages 1213–1222, Venice, Italy, 1995. Dipartimento di Matematica Pura ed Applicata, Università di Padova.
72. G. Manzini and L. Stolcis. A parallel multi-block Navier-Stokes solver on distributed memory machines. In C.A. Brebbia, H. Power, and P.D. Panagiotopoulos, editors, *Applications of high performance computing in engineering - IV*, pages 187–194, Milan, Italy, 19–21 June 1995. ASE-95, Computational Mechanics Publications.

73. G. Manzini, C. Vittoli, and P. Wilders. Parallel aspects of a multi-domain implicit time-stepping scheme for 2-D miscible flows in porous media. In C.A. Brebbia, H. Power, and P.D. Panagiotopoulos, editors, *Applications of high performance computing in engineering - IV*, pages 187–194, Milan, Italy, 19–21 June 1995. ASE-95, Computational Mechanics Publications.
74. L. Giraud and G. Manzini. Parallel distributed implementations of 2-D explicit Euler solvers. In W. Gentsch et. al., editor, *HPCN-94 – International Conference on High Performance Computing And Networking*, volume 1: Applications 1994, pages 151–156, Berlin, Germany, 1994. Springer Verlag.
75. A. Brandenburg, I. Procaccia, D. Segel, G. Manzini, and A. Vincent. Multifractality, near-singularity and the role of stretching in turbulence. In M. C. Proctor, P. C. Matthews, and A. M. Rucklidge, editors, *Solar and Planetary Dynamos*. ASI Meeting, NATO, Cambridge University Press, 1993. Workshop September 1992.

RAPPORTI TECNICI (NON PUBBLICATI IN ALTRA FORMA)

76. G. Manzini. The mimetic finite difference method with Lagrange multipliers. Pubblicazione 1PV08/1/0, IMATI-CNR, 2008.
77. E. Bertolazzi and G. Manzini. A mixed finite element solver for liquid-solid and liquid-liquid impacts. Pubblicazione 2003-3-PV, IMATI-CNR, 2003.
78. G. Manzini. Rapporto Finale del Progetto: Algoritmi innovativi dell'algebra lineare nella simulazione e ottimizzazione per la compatibilità elettromagnetica industriale e ambientale. Pubblicazione 2003-26-PV, Agenzia 2000 – IMATI-CNR, 2003.
79. M. Arioli and G. Manzini. The MI27 package implementation. Pubblicazione 1313, IAN-CNR, 2002.
80. E. Bertolazzi and G. Manzini. A finite volume method for transport of contaminants in porous media. Pubblicazione 1290, IMATI-CNR, 2002.
81. E. Bertolazzi and G. Manzini. A finite volume scheme for contaminant transport in porous media. Pubblicazione 1202, IAN-CNR, 2000.
82. E. Bertolazzi and G. Manzini. High-order IMEX-RK finite volume methods for multidimensional hyperbolic systems. Pubblicazione 1201, IAN-CNR, 2000.
83. E. Bertolazzi and G. Manzini. The kernel of P2MESH. Pubblicazione 1166, IAN-CNR, 1999.
84. E. Bertolazzi and G. Manzini. P2MESH: Programmer's Manual. Pubblicazione 1164, IAN-CNR, 1999.
85. E. Bertolazzi and G. Manzini. P2MESH: Programming finite element and finite volume methods. Pubblicazione 1165, IAN-CNR, 1999.
86. E. Bertolazzi and G. Manzini. P2MESH: Short Reference Guide. Pubblicazione 1167, IAN-CNR, 1999.

87. E. Bertolazzi and G. Manzini. Template classes for PDE solvers on 2D unstructured meshes. Pubblicazione 1124, IAN-CNR, 1998.
88. F. Brezzi, G. Manzini, D. Marini, P. Pietra, and A. Russo. Analisi delle proprietà di elementi finiti di tipo discontinuo. Pubblicazione 1107, IAN-CNR, 1998. (Progetto MIGALE).
89. G. Cornetti and G. Manzini. A high-order adjoint discontinuous Galerkin method for scalar conservation laws and systems. Pubblicazione 1080, IAN-CNR, 1998.
90. G. Cornetti and G. Manzini. An adjoint discontinuous Galerkin method for conservation laws. Pubblicazione 1049, IAN-CNR, 1997.
91. L. Bergamaschi, P. Consonni, G. Fotia, S. Mantica, G. Manzini, A. Quarteroni, and A. Rosella. Finite element and finite volume approximation of miscible flow. Pubblicazione CRS4-TECH-REP-95/17, CRS4, 1995. Oral presentation at Colloque sur les Modélisations et Méthodes Numériques en Ingègnèrie Pètrolière, Tunis, 20-21 Sep., 1995.
92. G. Manzini and G. Fotia. Note sulla discretizzazione numerica dei problemi iperbolici non-lineari. Pubblicazione CRS4-TECH-REP-95/11, CRS4, 1995.
93. G. Manzini and A. Rosella. The adaptive mesh refinement method applied to 2-D flows in porous media. Pubblicazione CRS4-APPMATH-94/19, CRS4, 1994. Oral presentation at SIMAI II, Anacapri, 1994 and ECMI 94, Kaiserslautern, 1994.
94. G. Manzini and L. Stolcis. High-order TVD shock-capturing schemes for unstructured grid solvers. Pubblicazione CRS4-APPMATH-94/18, CRS4, 1994.
95. L. Giraud and G. Manzini. A multi-domain Euler solver. Pubblicazione TR/CFD-PA/93/49, CERFACS, 1993.
96. G. Cornetti and G. Manzini. Il metodo di Galerkin discontinuo aggiunto per leggi di conservazione in piú dimensioni. Presentato a IperPV98, VI Incontro Nazionale sui Problemi di Tipo Iperbolico, Pavia, 1-3 ottobre 1998.
97. A. Quarteroni, D. Ambrosi, G. Fotia, G. Manzini, M. Mulas, and L. Stolcis. Recent applications of CFD in aeronautical industrial problems. Basel World CFD USER Days 1994, 2nd World Conference in Applied CFD, 1-5 May 1994.
98. G. Giraud and G. Manzini. Parallel explicit Euler solver. In *Parallel CFD 93*, 1993.
99. F. Rubini and G. Manzini. 2D numerical simulations of stellar jets. In *CRAY Conference of the UNAM*, Mexico City, Mexique, 1993.
100. M. Salvati, G. Einaudi, G. Manzini, F. Miniati, and F. Rubini. Synchrotron radiation in astrophysical bow shocks. In *SAIT Workshop*, Florence, Italy, 1993.

TESI DI DOTTORATO

101. G. Manzini. *Application de schémas numériques de capture de choc à haute résolution à des problèmes d'Astrophysique et de Geophysique*. PhD thesis, Université "P. Sabatier", Toulouse III, Rangueil, Toulouse, 1994.