

DEVELOPMENT OF A
NEW NEUTRONIC
MODEL OF THE TRIGA
MARK II REACTOR

Estratto in italiano

Introduzione

Negli ultimi anni, a seguito dello sviluppo che ha caratterizzato i sistemi di calcolo, l'analisi di sistemi quali i reattori nucleari si è sempre di più appoggiata all'utilizzo di simulazioni basate su modelli atti a riprodurre i suddetti impianti. Il vantaggio di queste ultime è legato sia ad una sensibile riduzione delle tempistiche computazionali, sia alla possibilità di esplorare in maniera esaustiva diversi lati e caratteristiche legati ad un determinato fenomeno. Esse permettono, da un lato, di evitare i costi legati all'installazione di impianti sperimentali e, dall'altro, di studiare e caratterizzare con maggiore accuratezza gli aspetti fenomenologici del reattore, visto come sistema multifisico. Il reattore costituisce un sistema la cui analisi abbraccia diverse branche, come quelle della termomeccanica, termoidraulica e neutronica. In particolare, in questo lavoro, l'aspetto cui si è rivolta attenzione è quello legato alla neutronica. Uno strumento altrettanto valido per la verifica e validazione dei sopra citati modelli è rappresentato dai reattori di ricerca, come il reattore TRIGA Mark II dell'Università di Pavia, già utilizzato in passato a questi scopi. Il lavoro qui presentato ha come scopo lo sviluppo e validazione di un modello tramite il codice Monte Carlo Serpent per il reattore TRIGA Mark II dell'Università di Pavia, caratterizzato dalla configurazione attuale del reattore, il cui ultimo aggiornamento risale al 2013. L'utilizzo di tale modello è volto all'applicazione dello stesso come strumento di analisi per le condizioni operative attuali del reattore. La base di partenza per il lavoro è stato un modello riferito alla configurazione a combustibile fresco del reattore (1965 circa) sviluppato con una precedente versione di Serpent (Castagna et al, 2017), da adattare all'attuale versione di Serpent che viene utilizzata e da aggiornare con dati riferiti alle composizioni e densità dei materiali all'intero del reattore riferiti al 2013. Gli strumenti disponibili per la validazione del modello sono dati, sia sperimentali sia ottenuti tramite altri codici Monte Carlo, relativi a grandezze quali il *core excess* e alcune configurazioni di criticità. In ultima analisi di validazione sono disponibili dati sperimentali relativi alla calibrazione di due barre di controllo del reattore.

Neutronica e Codici Monte Carlo

La grandezza caratteristica sfruttata per l'analisi di un reattore è la *reattività*, definita a partire dal coefficiente di moltiplicazione, il quale rappresenta il rapporto fra il numero di fissioni per una generazione neutronica e quello relativo alla generazione precedente.

In base al valore di reattività si possono definire diverse condizioni in cui viene operato il reattore: rispettivamente, *criticità* per valori nulli di reattività, *supercriticità* per valori positivi ed inferiori all'unità e *sottocriticità* per valori negativi. Per quanto riguarda la determinazione della reattività inserita tramite, per esempio, la movimentazione delle barre all'interno del reattore, è possibile trarre il valore della reattività inserita tramite il *metodo del periodo*, il quale è stato sfruttato anche in sede sperimentale per quanto riguarda i dati sfruttati per la validazione del modello sviluppato nell'ambito di questo lavoro di tesi. Questo metodo si basa sull'utilizzo dell'equazione *Inhour*, la pone la reattività in funzione di diversi parametri tra i quali, appunto, il periodo del reattore.

In particolare, il codice utilizzato, *Serpent*, è un codice Monte Carlo ottimizzato per i calcoli di fisica del reattore e caratterizzato dalla presenza di strutture geometriche pre-implementate disponibili. La più recente versione, utilizzata per sviluppare il modello aggiornato del reattore, presenta inoltre dei vantaggi rispetto alle versioni precedenti in termini di ottimizzazione della memoria e di possibile accoppiamento con codici di termoidraulica e termomeccanica, nonché schemi ottimizzati per i calcoli di burnup.

Il reattore TRIGA Mark II

Il reattore TRIGA (Training Research and Isotope production General Atomics) Mark II è un reattore progettato e prodotto a partire dai primi anni '50 dalla General Atomics con lo scopo di avere un reattore di ricerca caratterizzato da un'elevata sicurezza intrinseca ed un costo moderato. Il reattore TRIGA Mark II dell'Università di Pavia è stato portato per la prima volta a criticità nel 1965 e viene utilizzato come reattore di ricerca e per la produzione di radioisotopi. Il combustibile è caratterizzato dalla presenza, oltre dell'uranio, di idrogeno e zirconio, che forniscono una capacità moderante che decresce molto rapidamente all'aumentare della temperatura. Il nocciolo è caratterizzato da sei anelli concentrici che ospitano in totale novanta canali che servono per posizionare sia gli elementi di combustibile sia quelli di grafite, sia per inserire la sorgente quando necessario o si prestano al fine di essere utilizzati come canali di irraggiamento. Gli elementi di combustibile originali erano di un unico tipo, denominato 101, mentre ad oggi vi sono tre tipi diversi di barre di combustibile, in particolare 101, 103 e 104, caratterizzate in due casi dalla presenza di dischi di molibdeno e samario, sfruttati come veleni bruciabili. Negli anni passati, sono stati effettuati studi relativi a fenomeni di

burnup riguardanti i materiali all'interno del reattore (Chiesa, 2013) e a settembre 2013 vi è stata una riconfigurazione del nocciolo del reattore. Il reattore è caratterizzato dalla presenza di tre barre di controllo, denominate Transient, Shim e Regulating, le quali sono atte rispettivamente alla garanzia della sicurezza del reattore, alla regolazione grezza e alla regolazione fine della reattività. Le variazioni principali fra la configurazione cosiddetta *fresh-fuel* e quella odierna sono legate ai tre tipi diversi di barre presenti oggi, allo svuotamento del canale centrale del reattore, che erano originariamente riempito con acqua, al fatto che i materiali hanno subito fenomeno di burnup e infine alla riconfigurazione avvenuta nel 2013.

Il modello aggiornato

A partire dal modello relativo alla prima versione di Serpent, quindi relativo alla configurazione originale, si è prima verificato che il modello fosse adoperabile anche tramite Serpent 2. Si sono ottenuti risultati compatibili con le criticità sperimentali, osservabili nella figura 1, considerando la presenza di errori statistici e sistematici nell'analisi di quanto ottenuto tramite Serpent.

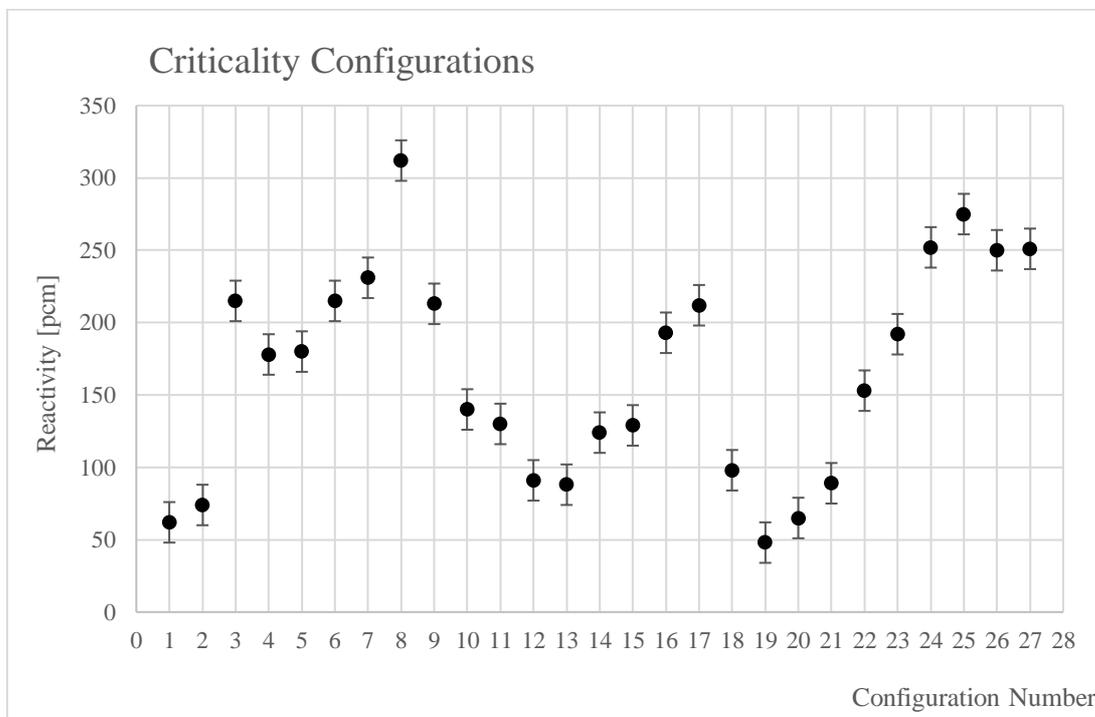


Figura 1: Configurazioni di criticità ottenute tramite Serpent 2 per il modello a combustibile fresco.

La presenza di errori sistematici è legata in primis ai dati, relativi ai materiali, risalenti agli anni '60. Studi effettuati in merito hanno riscontrato un contributo di tali errori, per quanto riguarda le definizioni dei materiali nel modello a combustibile fresco, da quantificarsi come almeno 190 pcm in termini di reattività. Inoltre, va sottolineata l'incertezza che caratterizza i dati, risalenti allo stesso arco temporale citato precedentemente, relativi alle barre di controllo, in particolare alla barra Transient. Considerando i due fattori, cioè le due fonti di incertezza, appena introdotti, i dati relativi alle configurazioni di criticità risultano accettabili, seppur caratterizzati da valori di reattività in alcuni casi elevata.

Si sono successivamente implementate le differenze all'interno del modello, partendo dalle definizioni di nuovi tipi di elementi di combustibile. In secondo luogo sono stati sfruttati i dati ottenuti tramite studi precedenti relativi al burnup aggiornato al 2013 dei materiali presenti nel reattore effettuati tramite MCNP e sono stati adattati in modo da essere utilizzabili tramite Serpent. Anche le variazioni in termini di geometria sono state implementate all'interno del modello. Tramite le figure 2 e 3 è possibile osservare rispettivamente la stessa sezione ottenuta con il modello a combustibile fresco e con il modello aggiornato, ove si possono apprezzare le differenze tra le due configurazioni per quanto riguarda il nocciolo. Va sottolineato che, nell'intento di poter sfruttare il modello anche per riprodurre condizioni di criticità a piena potenza, sono stati sfruttati studi effettuati in precedenza riguardanti la distribuzione di temperatura all'interno del combustibile discretizzata a seconda dell'anello considerato all'interno del nocciolo e, discretizzando in senso verticale, dividendo gli elementi in cinque sezioni diverse, in modo tale da associare ad ognuno un valore di cross section quanto più fedele alla condizione reale in termini termici. In figura 4 è mostrato un riassunto schematico delle differenze principali fra il modello a combustibile fresco e quello aggiornato alla configurazione del nocciolo del 2013.

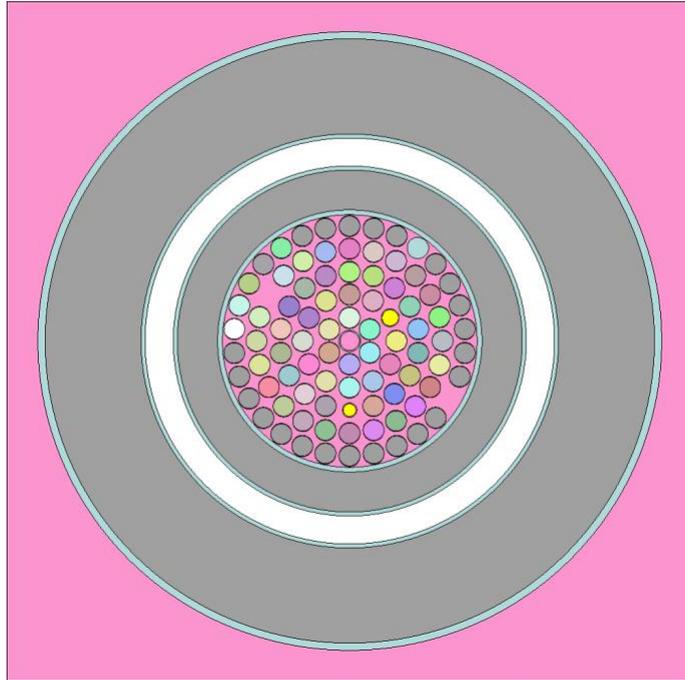


Figura 2: Sezione radiale del reattore TRIGA Mark II ottenuta tramite Serpent 2 per la configurazione originale.

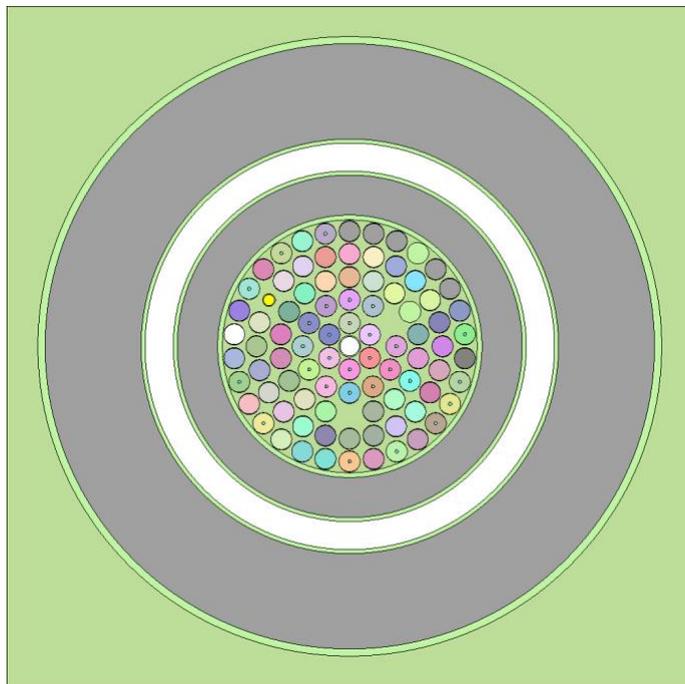


Figura 3: Sezione radiale del reattore TRIGA Mark II ottenuta tramite Serpent 2 per la configurazione aggiornata all'anno 2013.

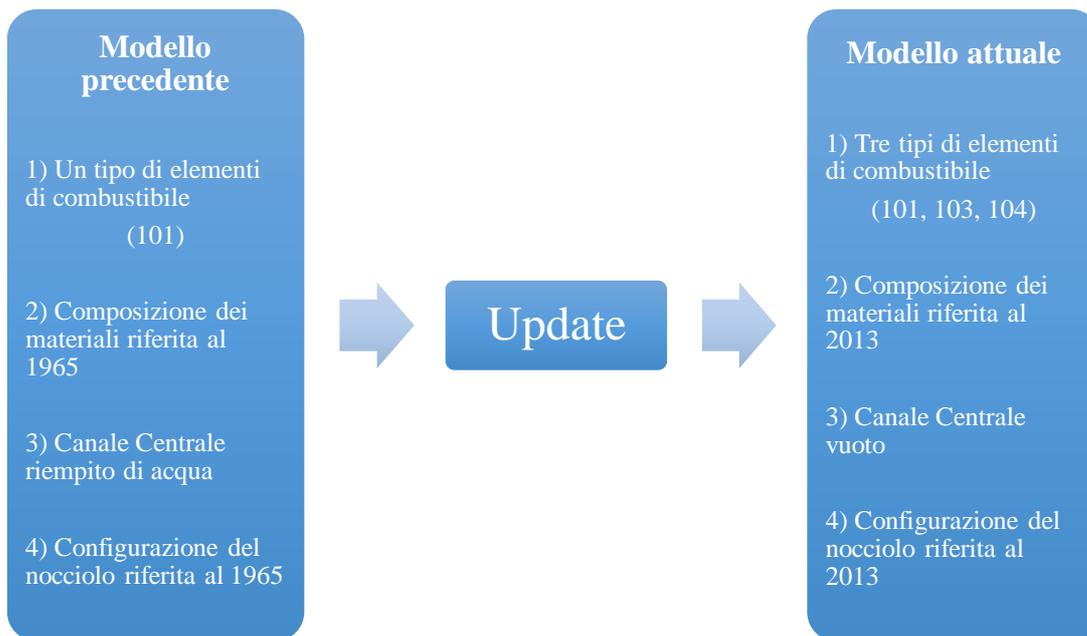


Figura 4: Riassunto schematico della procedura di aggiornamento del modello

Risultati

Per quanto riguarda i risultati ottenuti tramite le simulazioni effettuate sfruttando il modello, è necessario fare menzione delle due fonti principali di incertezza che caratterizzano i risultati. Prima di tutto, l'errore statistico associato alle simulazioni Monte Carlo stesse, il quale è proporzionale all'inverso della radice del numero di vite neutroniche simulate. In secondo luogo, vi è l'influenza di errori di tipo *sistematico* legati alle incertezze riguardanti i dati relativi alle composizioni e alle densità dei materiali costituenti il reattore e sfruttati per sviluppare il modello. Questo tipo di errore è stato quantificato in termini di reattività come circa 190 pcm per quanto riguarda la condizione a combustibile fresco, seppur si tratti di un limite inferiore nel senso stretto di errore sistematico per il lavoro in analisi. Infatti, i dati relativi ai materiali sfruttati nel modello relativo a questo lavoro di tesi e alle densità degli stessi sono stati in precedenza sottoposti a calcoli di burnup tramite codici Monte Carlo. A seguito di ciò, per ottenere una quantificazione fedele degli errori sistematici relativi ai materiali, bisognerebbe tenere in considerazione la propagazione dell'errore dovuta ai suddetti calcoli.

I primi dati riprodotti tramite simulazione sfruttando il modello sviluppato sono stati relativi alla prima configurazione di criticità a piena potenza e al core excess, per i quali

si è effettuato un confronto sia con i dati sperimentali sia con risultati ottenuti tramite altri studi effettuati con MCNP (Chiesa, 2013). Per quanto riguarda la riproduzione della configurazione di criticità, il risultato ottenuto $1,99996 pcm \pm 7 pcm$, dove si è tenuto in considerazione l'errore statistico del Monte Carlo si è mostrato in accordo con i dati sperimentali; ciò è stato riscontrato anche per il risultato pertinente al core excess, considerando un intervallo di 1σ attorno al risultato ottenuto tramite Serpent.

Per quanto riguarda l'incertezza relativa ai risultati ottenuti tramite simulazione con Serpent, essa dipende dal numero di cicli che vengono effettuati dal software ed il numero di neutroni generati dalla simulazione per ogni ciclo. Vi è una relazione di proporzionalità inversa, infatti, fra la suddetta incertezza e la radice del prodotto di queste due ultime grandezze. Per ogni simulazione effettuata nell'ambito di questo lavoro di tesi, sono stati generati 8000 cicli da 40000 neutroni l'uno. L'incertezza riguardante gli output forniti da Serpent si è quindi attestata sempre attorno a $7 pcm$.

Risultati per la Criticità

In seguito alla riproduzione della prima criticità a piena potenza e del core excess, sfruttando dei dati sperimentali relativi rispettivamente agli anni 2015 e 2018, si è cercato di riprodurre, tramite l'utilizzo del modello aggiornato, alcune configurazioni di criticità. Le configurazioni sono state ottenute in sede sperimentale in occasione della calibrazione di due barre di controllo, i cui risultati sono discussi in seguito. In figura 5 sono mostrati i dati relativi a quanto ottenuto tramite Serpent.

Dalla figura, si può osservare come le configurazioni relative ai dati dell'anno 2018 presentino un offset verso valori di reattività superiori, questo dovuto probabilmente al fatto che i materiali all'interno del reattore hanno subito fenomeni di burnup di cui il modello non tiene conto, essendo riferito all'anno 2013. Va sottolineato, tuttavia, che nei limiti dell'incertezza statistica e sistematica entrambi i set di dati risultano in accordo con quanto ottenuto a livello di criticità sperimentale.

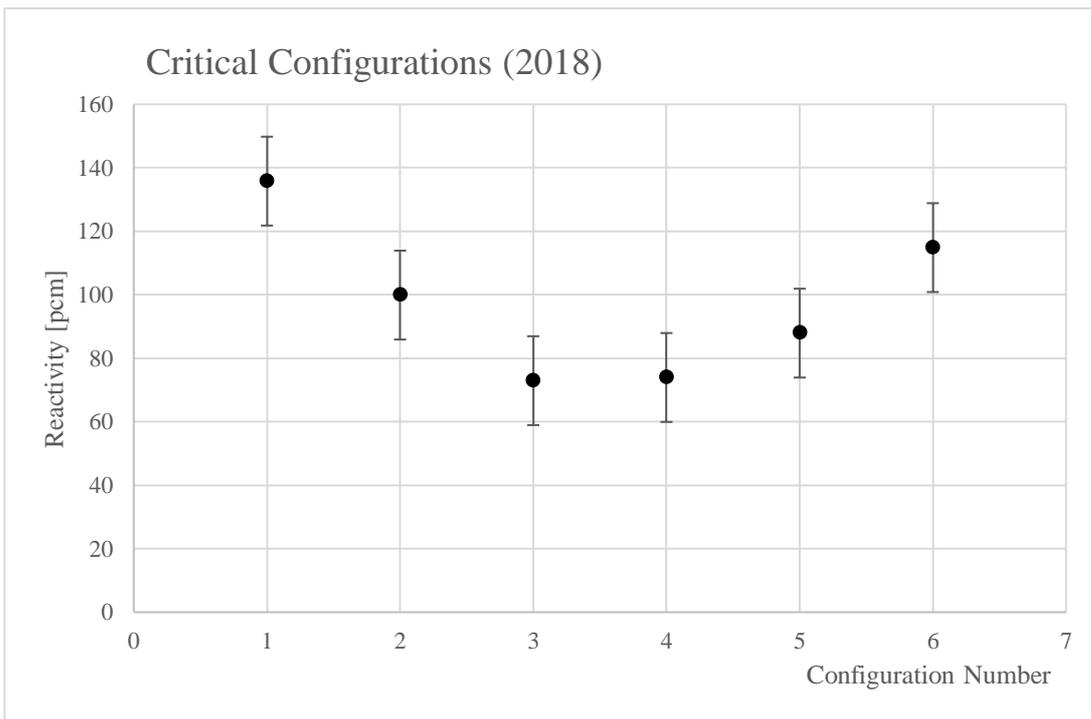
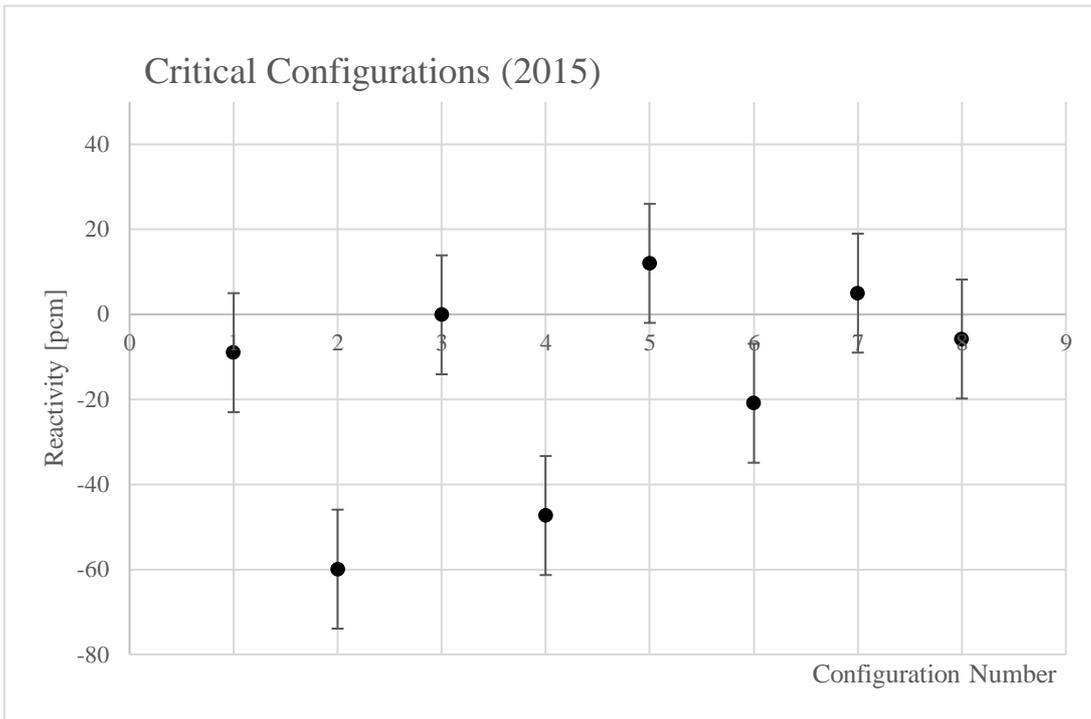


Figura 5: Risultati per la riproduzione delle configurazioni di criticità relative rispettivamente agli anni 2015 e 2018.

Risultati per la Calibrazione

Un'ulteriore validazione del modello si è ricercata tramite il confronto con dati relativi alla calibrazione della barra di controllo Regulating e della parziale calibrazione della barra di controllo Shim, effettuate sperimentalmente negli anni 2015 e 2018 tramite metodo del periodo. A livello prettamente procedurale, la calibrazione viene effettuata partendo da una condizione di criticità con la barra Transient completamente estratta, la barra Shim parzialmente inserita e la barra Regulating totalmente inserita. Vengono poi progressivamente effettuate inserzioni di reattività estraendo parzialmente la regulating e misurando il tempo necessario per ottenere una determinata crescita di potenza. Il dato misurato verrà conseguentemente manipolato, in modo tale da ottenere la reattività inserita tramite movimentazione della barra Regulating. Successivamente, la barra Shim viene proporzionalmente posta in maggiore profondità nel nocciolo in modo tale da ristabilire una condizione di criticità. Le precedenti operazioni vengono ripetute fino a completa estrazione della barra Regulating. È possibile quindi ottenere, a partire dai dati misurati, curve di calibrazione sia integrale che differenziali per la barra Regulating. Per quanto riguarda la barra Shim, è possibile effettuare una calibrazione solo parziale, non effettuando una corsa completa della barra di controllo. Per quanto riguarda gli errori legati alle procedure sperimentali, si è tenuto conto dell'incertezza legata a tutti i parametri necessari ad ottenere la reattività a partire dalle misure sperimentali. Sfruttando la tecnica proposta da Moffat, che prevede che l'incertezza di un parametro ottenuto tramite combinazione di più grandezze si calcoli tenendo in considerazione i limiti superiori e inferiori di tutti i parametri coinvolti e affetti da incertezza, si è calcolato l'errore per ogni punto sperimentale di calibrazione in termini di reattività.

Le condizioni di criticità per i due set di dati sperimentali relativi agli anni 2015 e 2018 sono stati riprodotti, ottenendo risultati in entrambi i casi in accordo con i dati sperimentali considerando sia l'errore statistico Monte Carlo sia l'incertezza legata agli errori sistematici. Si sono poi riprodotte le curve di calibrazione integrale, effettuando per quanto possibile una ricostruzione per quanto riguarda la barra Shim, avendo a disposizione solo dati differenziali e quindi parziali. I dati relativi alla calibrazione per quanto riguarda la barra Regulating sono apprezzabili in figura 6 e 7.

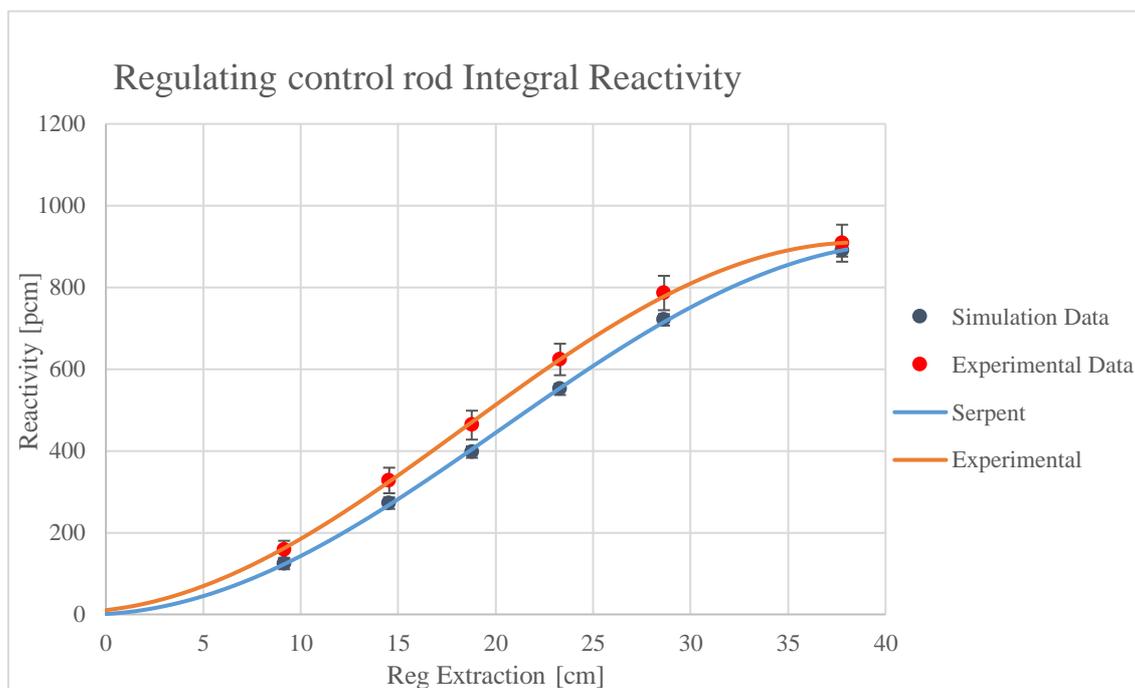
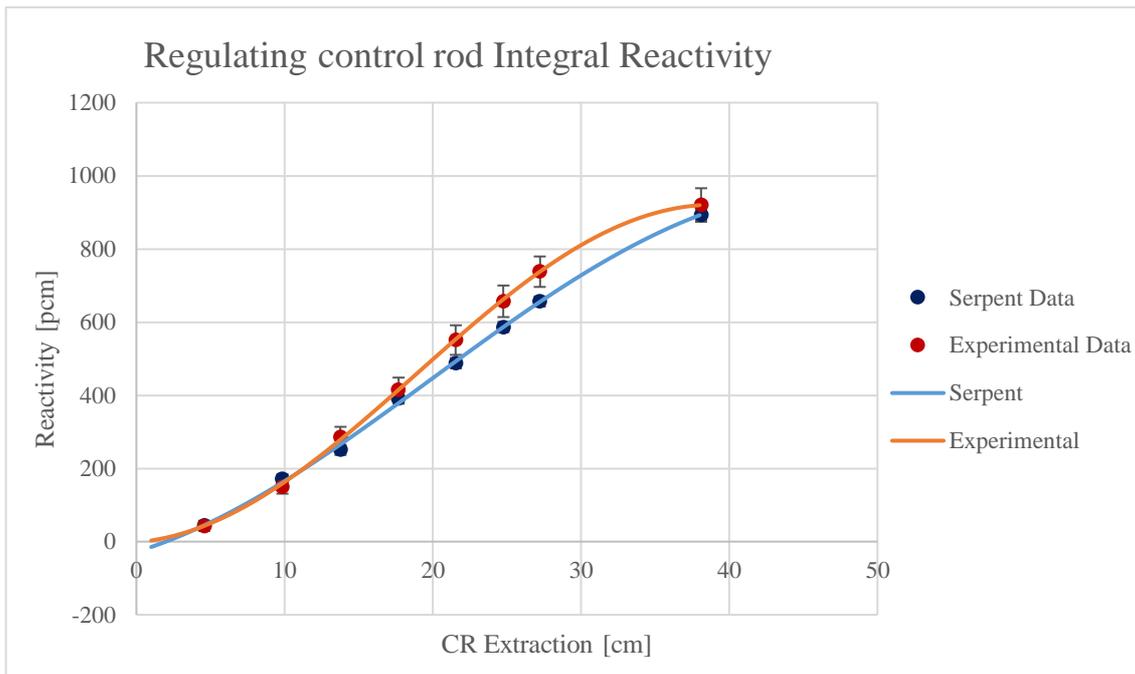


Figura 6: Curve di calibrazione Integrale per la barra Regulating ottenute sperimentalmente e tramite Serpent con il modello sviluppato rispettivamente per i dati relativi all'anno 2015 e 2018.

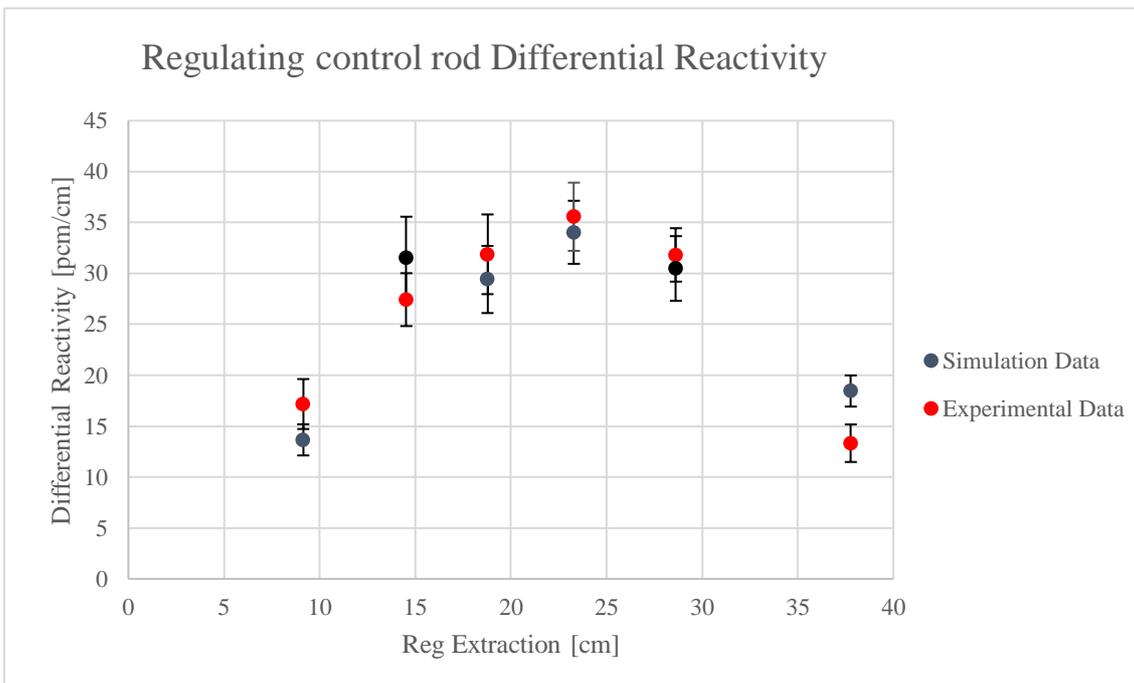
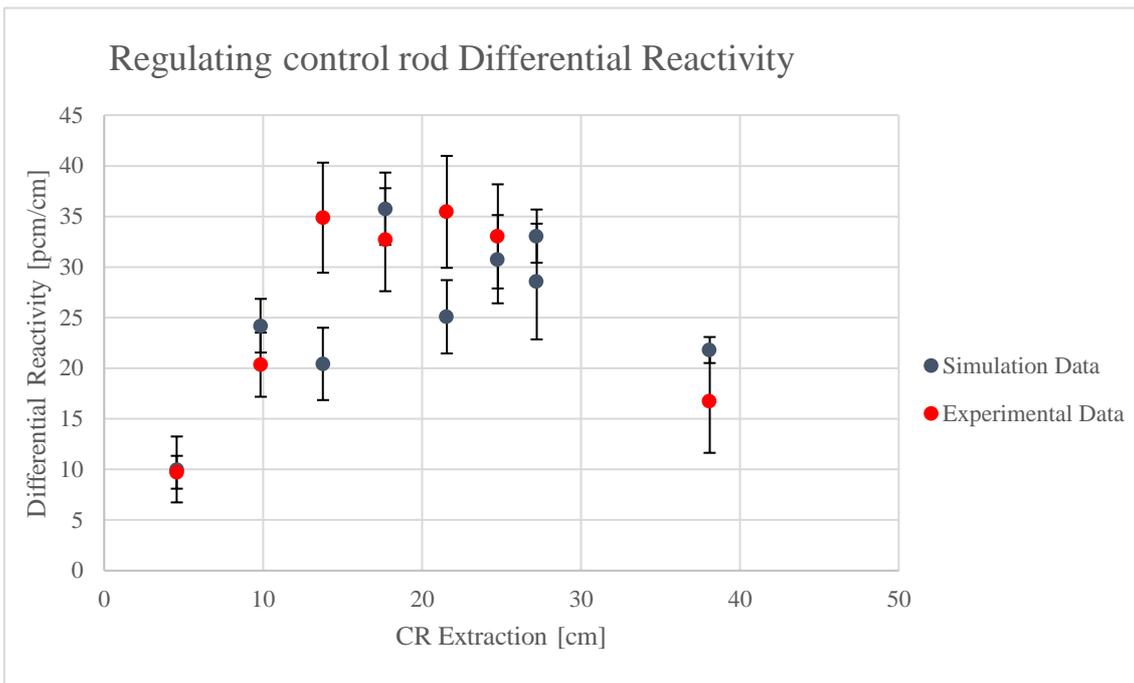


Figura 7: Dati relativi alla reattività differenziale per la barra Regulating ottenuti sperimentalmente e tramite Serpent con il modello sviluppato rispettivamente per i dati relativi all'anno 2015 e 2018

I dati ottenuti tramite simulazioni a partire dal modello sviluppato si sono rivelati in buon accordo con i dati sperimentali per entrambi i set, cioè sia per il 2015 che per il 2018.

Nonostante sia giusto sottolineare la presenza dell'offset rispetto alle configurazioni di criticità introdotto precedentemente, è altrettanto fondamentale ricordare che, tenendo conto delle fonti di incertezza prese in analisi per questo lavoro, il modello risulta valido nella riproduzione dei dati relativi alla reattività integrale e differenziale. Nel caso si consideri, poi, la presenza di errori sistematici, i quali forniscono un contributo che si attesta almeno a 190 pcm, tutte le configurazioni di criticità risultano in accordo con i dati ottenuti sperimentalmente in un intervallo 1σ .

Considerando la seconda barra di controllo, in figura 10 e 11 è possibile osservare i dati ottenuti per quanto riguarda la barra Shim sia sperimentalmente che tramite Serpent. Tramite i dati differenziali è possibile osservare come, in particolare per l'anno 2018, il modello sia in accordo con i dati sperimentali. Si è inoltre effettuato un test χ^2 per valutare la bontà degli output, in termini di reattività differenziale, provenienti dal modello rispetto a quelli sperimentali e i risultati sono stati soddisfacenti, soprattutto per i dati relativi all'anno 2018. In tabella 8 e 9 sono visibili i risultati ottenuti relativi al test χ^2 , a seguito del quale, prendendo come valore di riferimento per il p-value il 5%, solo il dato relativo alla calibrazione della barra Shim effettuata nel 2015 ha ottenuto un risultato inferiore. Considerando i risultati nell'insieme, tuttavia, si può confermare che quanto ottenuto tramite Serpent è in buon accordo con i dati sperimentali.

Barra di controllo	χ^2	ν	p-value
Regulating	13,16	8	10%
Shim	17,03	7	1,9%

Tabella 8: Risultati del test χ^2 relativo a dati sperimentali e simulati per l'anno 2015.

Barra di controllo	χ^2	ν	p-value
Regulating	7,21	6	30%
Shim	5,35	5	40%

Tabella 9: Risultati del test χ^2 relativo a dati sperimentali e simulati per l'anno 2018.

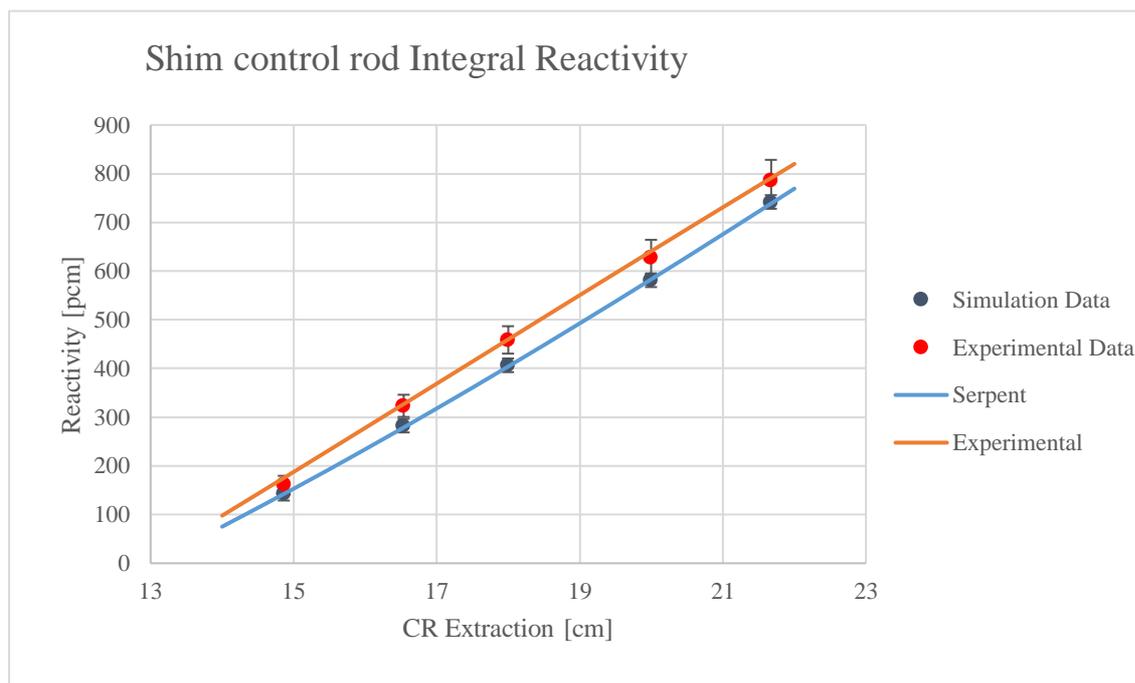
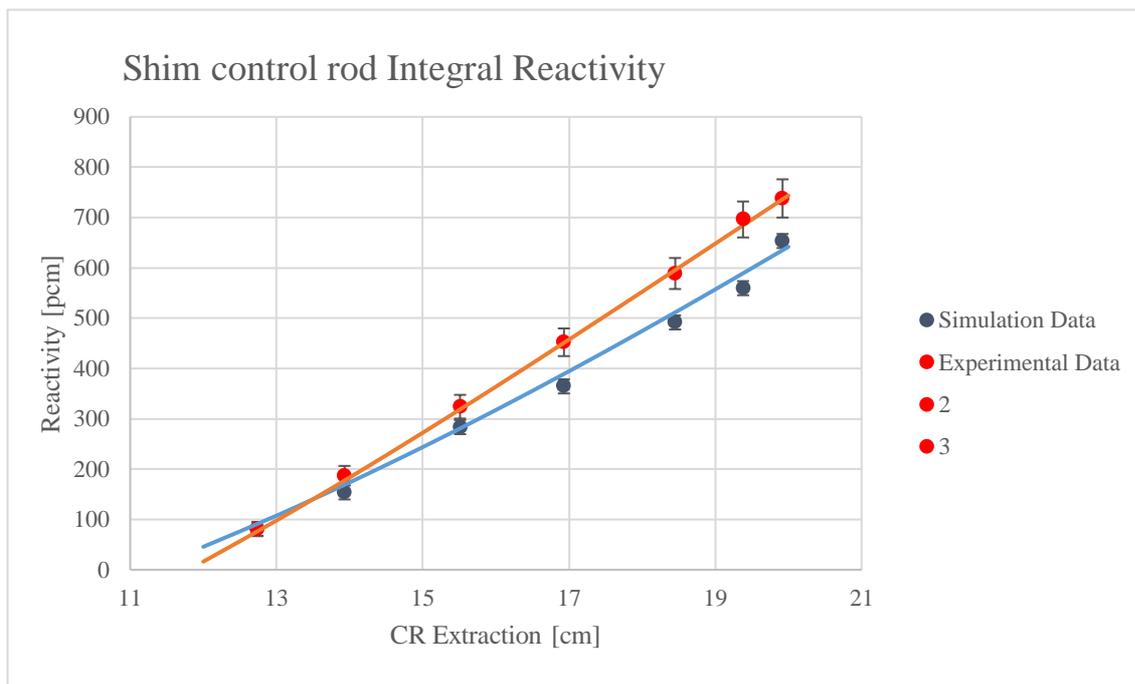


Figura 10: Curve di calibrazione Integrale parziale per la barra Shim ottenute sperimentalmente e tramite Serpent con il modello sviluppato rispettivamente per i dati relativi all'anno 2015 e 2018.

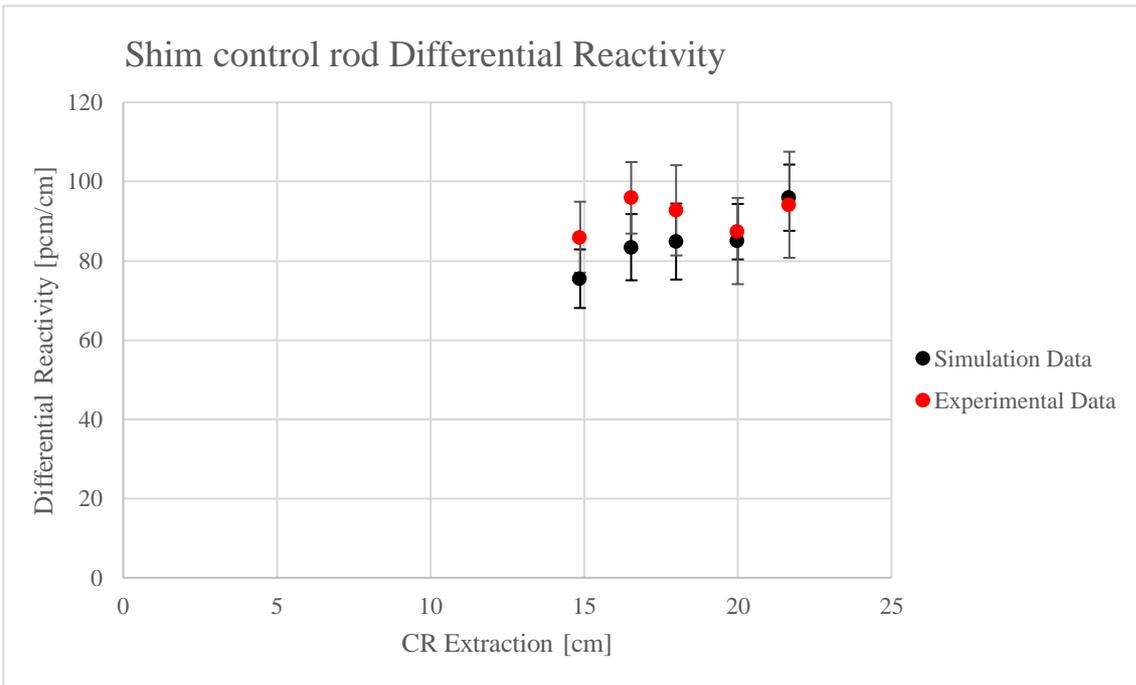
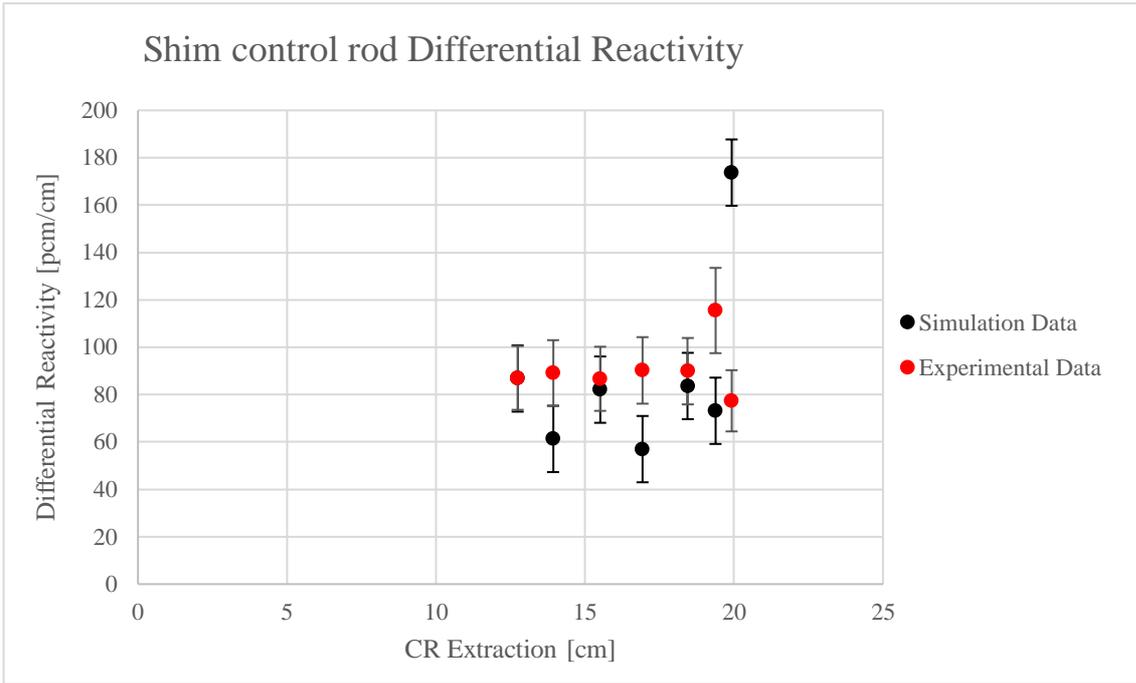


Figura 11: Dati di calibrazione differenziale per la barra Regulating ottenute sperimentalmente e tramite Serpent con il modello sviluppato rispettivamente per i dati relativi all'anno 2015 e 2018.

Dal punto di vista della calibrazione delle barre di controllo, il modello sviluppato si è dimostrato quindi un valido strumento nel simulare le variazioni di reattività introdotte tramite le barre di controllo analizzate.

In generale, considerando non solo i risultati ottenuti non solo per la calibrazione, ma anche per le configurazioni di criticità sia a piena potenza che a bassa potenza e il core excess, il modello aggiornato è risultato valido e in accordo con i dati sperimentali.

Conclusione

Il lavoro di tesi qui riassunto ha avuto lo scopo di sviluppare un modello aggiornato all'ultima configurazione del nocciolo per il reattore TRIGA Mark II dell'Università di Pavia. Grazie a lavori già sviluppati in precedenza riguardanti la configurazione del reattore a combustibile fresco e a studi effettuati sui materiali presenti all'interno del reattore, è stato possibile sviluppare in modello in maniera aderente all'attuale composizione dei materiali e configurazione del nocciolo. Tramite confronti code-to-code con lavori svolti con MCNP e comparazione dei risultati ottenuti con dati sperimentali è stato possibile validare il modello entro gli intervalli di incertezza che tenessero conto sia di errori di tipo sistematico sia di tipo statistico. Gli output relativi alle configurazioni riprodotte sono risultati in buon accordo con i dati sperimentali, seppur osservando un leggero offset rispetto alla criticità nella riproduzione di configurazioni relative al 2018. Riferendosi il modello a dati per i materiali relativi al 2013, è possibile ipotizzare che i materiali stessi abbiano subito effetti di burnup. Nonostante ciò, quanto ottenuto dalle simulazioni di criticità e da quelle relative alle calibrazioni delle barre di controllo è in accordo con i dati sperimentali, mostrando come il modello aggiornato del reattore TRIGA Mark II possa essere utilizzato come strumento di analisi dell'attuale configurazione del reattore. Futuri sviluppi e applicazioni di questo modello coinvolgono il suo utilizzo per calcoli di burnup e accoppiamento dello stesso con la termoidraulica, con l'obiettivo di ottenere una descrizione completa del sistema.

