

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Corso di Laurea Magistrale in Informatica

# Utilizzo dei Transformers per la classificazione delle vulnerabilit negli Smart Contracts

Relatore:  
Chiar.mo Prof.  
Stefano Ferretti

Presentata da:  
Marco Benito Tomasone

Correlatore:

Sessione I  
Anno Accademico 2023/2024



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Motivazioni e Lavori Correlati</b>	<b>10</b>
2.1	Motivazioni . . . . .	10
2.1.1	Blockchain . . . . .	11
2.1.2	Ethereum . . . . .	13
2.1.3	Smart Contracts . . . . .	14
2.2	Vulnerabilit negli Smart Contracts . . . . .	15
2.2.1	Reentrancy . . . . .	16
2.2.2	Unchecked-Calls . . . . .	19
2.2.3	Arithmetic . . . . .	20
2.2.4	Other . . . . .	22
2.3	Lavori Correlati . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>28</b>
3.1	Esplorazione dei dati . . . . .	28
3.1.1	Analisi delle Lunghezze dei contratti . . . . .	30
3.1.2	Distribuzione delle Classi e Matrici di Co-occorrenza . . . . .	32
3.2	Modellazione . . . . .	36
3.2.1	Natural Language Processing, NLP . . . . .	36
3.2.2	BERT, Bidirectional Encoder Representations from Transformers . . . . .	37
3.2.3	DistilBERT . . . . .	41
3.2.4	RoBERTa e CodeBERT . . . . .	42
3.3	Implementazione . . . . .	45
3.3.1	Pre-Processing dei Dati . . . . .	46
3.3.2	BERT-base . . . . .	49
3.3.3	DistilBERT . . . . .	50
3.3.4	CodeBERT . . . . .	51
3.3.5	CodeBERT con aggregazione . . . . .	52
3.3.6	CodeBert con concatenazione . . . . .	53
3.3.7	Train e Validation . . . . .	54

3.4	Stacking . . . . .	54
3.5	Gemini . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Results</b>	<b>59</b>
4.1	Metriche di Valutazione . . . . .	59
4.2	Risultati modelli sul Bytecode . . . . .	61
4.2.1	Analisi . . . . .	65
4.3	Risultati sul Codice Sorgente Solidity . . . . .	66
4.3.1	Analisi . . . . .	69
4.4	Risultati Stacking . . . . .	70
4.4.1	Alberi di Decisione . . . . .	70
4.4.2	Regressione Logistica . . . . .	71
4.4.3	Random forest . . . . .	71
4.5	Risultati Gemini . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>74</b>

# Elenco delle figure

2.1	Esempio di architettura di una blockchain . . . . .	12
2.2	Andamento del prezzo di BEC prima e dopo l'attacco . . . . .	21
3.1	Distribuzioni delle lunghezze del source code e del bytecode. . . . .	31
3.2	Distribuzioni delle Classi nell'intero dataset, in termini relativi e assoluti. . . . .	33
3.3	Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Addestramento . . . . .	34
3.4	Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Test . . . . .	34
3.5	Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Validazione . . . . .	35
3.6	Architettura di Transformers, BERT <sub>BASE</sub> e BERT <sub>LARGE</sub> . . . . .	39
3.7	Rappresentazione degli input di BERT . . . . .	40
3.8	Architettura di DistilBERT . . . . .	43
3.9	Confronto tra i tre metodi di fusione. (a) Fusione basata su caratteristiche. (b) Fusione basata su decisioni. (c) Fusione Ibrida. . . . .	55
4.1	Confusion Matrices per le diverse classi . . . . .	73

# Elenco delle tabelle

3.1	Percentuali di ogni split rispetto al totale . . . . .	30
3.2	Conteggio e Percentuale di Contratti Senza Bytecode per Dataset . . . . .	30
3.3	Percentuale di contratti sotto varie lunghezze in token. . . . .	32
3.4	Distribuzione delle Classi nei Dataset di Addestramento, Test, Validazione e Completo . . . . .	32
3.5	Percentuale dnelle classi in cui la classe stessa non l'unica vulnerabilit presente. . . . .	36
3.6	Parametri principali dei modelli BERT <sub>BASE</sub> e BERT <sub>LARGE</sub> . . . . .	38
4.1	Classification Report del modello BERT sul bytecode . . . . .	62
4.2	Classification Report del modello CodeBert sul bytecode . . . . .	63
4.3	Classification Report per il modello Code Bert con aggregazione a due chunk usando la media . . . . .	63
4.4	Classification Report per il modello Code Bert con aggregazione a due chunk usando il massimo . . . . .	64
4.5	Classification Report per CodeBert con aggregazione a tre chunk usando la media . . . . .	64
4.6	Classification Report per CodeBert con aggregazione a tre chunk usando il massimo . . . . .	65
4.7	Classification Report per CodeBERT con concatenazione di due chunk . . . . .	65
4.8	Classification Report del modello codeBERT con concatenazione di due chunk . . . . .	67
4.9	Classification Report del modello codeBERT con concatenazione di tre chunk . . . . .	67
4.10	Classification Report del modello codeBERT con aggregazione di due chunk . . . . .	68
4.11	Classification Report del modello con aggregazione di due chunk . . . . .	68
4.12	Classification Report del modello con aggregazione di tre chunk e funzione Max . . . . .	69
4.13	Classification Report del modello codeBERT con aggregazione mean di tre chunk . . . . .	69
4.14	Classification Report per il modello Decision Tree . . . . .	70
4.15	Classification Report per il modello di Regressione Logistica . . . . .	71

4.16	Classification Report per il modello Random Forest . . . . .	72
4.17	Classification Report del modello Gemini . . . . .	72

# Capitolo 1

## Introduzione

Negli ultimi anni gli smart contracts sono diventati una tecnologia sempre pi popolare, attirando l'attenzione di molte aziende e sviluppatori. Questo interesse giustificato dalle loro features innovative, come l'immutabilit, il fatto che vengano eseguiti in una blockchain ed la loro esecuzione automatica. Tutta questa attenzione viene confermata dal loro inserimento all'interno di una proposta di regolamentazione da parte dell'Unione Europea [?]. Gli Smart Contracts vengono considerati un sistema per promuovere la condivisione dei dati, con la certezza che le condizioni di condivisione dei dati vengano rispettate. Proprio questa garanzia che le condizioni vengano rispettate solleva quelle che sono le preoccupazioni principali legate a problemi di sicurezza negli Smart Contracts.

La pi grande piattaforma di Blockchain che permette l'esecuzione degli smart contracts Ethereum. Gli smart contracts di Ethereum sono scritti in Solidity, un linguaggio di programmazione Turing-completo ad alto livello. Tuttavia, la scrittura di smart contracts sicuri una sfida, in quanto anche piccoli errori possono portare a gravi conseguenze. Gli smart contracts sono immutabili e una volta pubblicati non possono essere modificati e questa loro caratteristica pu rilevarsi il loro principale punto debole. Infatti, qualsiasi errore o vulnerabilit presente in uno smart contract pu essere sfruttato da un attaccante per rubare fondi o causare altri danni.

Per questo motivo, diventa fondamentale per gli sviluppatori avere dei tool che permettano di rilevare automaticamente le vulnerabilit presenti negli smart contracts che sviluppano. Spesso, per risolvere questo task si fa riferimento a tecniche di analisi statica, che permettono di analizzare il codice sorgente o il bytecode di uno smart contract senza effettuarne l'esecuzione effettiva. Questo approccio consente di identificare potenziali problematiche senza la necessit di testare il codice in un ambiente reale, di contro per queste tecniche si rivelano essere molto lente e fanno troppo affidamento al riconoscimento di pattern conosciuti o si basano su dei set di regole predefinite, che possono non essere esaustive o non riconoscere nuove vulnerabilit.

Un'alternativa a queste tecniche l'utilizzo di tecniche di Machine Learning e Deep Learning. Queste tecniche permettono di rilevare le vulnerabilit presenti negli smart



contracts in maniera pi rapida e con una maggiore accuratezza rispetto alle tecniche di analisi statica. In questo campo, negli ultimi anni c' stato un notevole interesse e sono stati proposti diversi approcci che utilizzano tecniche di Machine Learning e Deep Learning per la rilevazione di vulnerabilit negli smart contracts. Questi approcci si basano sull'addestramento di modelli di Machine Learning e Deep Learning.

Questo lavoro di tesi si inserisce in questo contesto e propone un approccio basato su tecniche di Deep Learning utilizzando modelli basati sui Transformers per la rilevazione di vulnerabilit negli smart contracts. In particolare, questo lavoro ha l'obiettivo di costruire dei modelli che siano in grado di rilevare cinque classi di vulnerabilit:

- Access-Control
- Arithmetic
- Other
- Reentrancy
- Unchecked-Calls

Il contributo di questo lavoro consiste nel dimostrare l'utilizzo di modelli basati sui Transformers per la rilevazione di vulnerabilit negli smart contract. In particolare, sono stati impiegati i modelli BERT, DistilBERT e CodeBERT per la classificazione. Considerando che questi modelli presentano un limite di 512 token in input e che i contratti possono essere significativamente pi lunghi, stato sperimentato un approccio di segmentazione del testo in sottocontratti e successiva aggregazione o concatenazione degli stessi. Questi modelli sono stati addestrati sia utilizzando il bytecode sia il codice sorgente dei contratti.

Inoltre, data la crescente diffusione di chatbot e assistenti virtuali nelle nostre vite, sia per il supporto a compiti di vario genere sia come ausilio alla programmazione, stato testato il modello Gemini di Google per valutare la sua performance in un task di classificazione di questo tipo. I risultati ottenuti da questo modello non sono stati soddisfacenti, evidenziando come per task di questo genere sia necessario utilizzare modelli specificamente addestrati.

I risultati ottenuti mostrano come questi modelli siano in grado di rilevare le vulnerabilit presenti negli smart contracts con delle ottime performance. In particolare, il modello CodeBERT, un modello preaddestrato su codice sorgente, ha ottenuto i risultati migliori, sia classificando il codice sorgente che classificando il codice bytecode in esadecimale. I migliori risultati, con un F1 Score dell'88% sono stati ottenuti dal modello CodeBERT che classificava il codice sorgente aggregando con la funzione max tre blocchi da 512 tokens. I migliori risultati classificando il bytecode sono stati sempre ottenuti dal modello

CodeBERT che classificava solo i primi 512 token della sequenza con un F1 score dell'83%.

La suddivisione di questo lavoro è articolata come segue:

- il capitolo due illustra le motivazioni alla base del presente lavoro di tesi, introducendo il concetto di smart contract e sottolineando l'importanza della rilevazione delle vulnerabilità in essi presenti. Verranno inoltre descritte alcune delle principali classi di vulnerabilità riscontrabili negli smart contract. Successivamente, sarà presentata una revisione della letteratura esistente in questo campo, con una panoramica dei lavori più significativi che hanno trattato questo tema.
- il terzo capitolo espone la metodologia adottata in questo lavoro. Inizialmente, sarà condotta un'analisi esplorativa del dataset. Successivamente, saranno introdotti i modelli utilizzati, BERT, DistilBERT e CodeBERT, con una dettagliata descrizione delle loro architetture e delle modalità di addestramento. Saranno illustrate le implementazioni e il setup dei vari esperimenti condotti. Inoltre, in questo capitolo sarà presentato il modello Gemini di Google e verrà spiegato come è stato applicato nel contesto di questo studio.
- il quarto capitolo riporta i risultati ottenuti nel corso del lavoro. Saranno presentate le performance dei vari modelli addestrati, valutate in termini di accuratezza, precisione, recall e F1 score. Infine, saranno mostrati i risultati ottenuti con il modello Gemini di Google.
- il quinto ed ultimo capitolo riporta le conclusioni del lavoro svolto, con una discussione dei risultati ottenuti e delle possibili direzioni future di ricerca.

## Capitolo 2

# Motivazioni e Lavori Correlati

In questa sezione della tesi, verranno illustrate in modo approfondito le motivazioni che hanno guidato la scelta del tema di ricerca. Inoltre, saranno presentati e discussi alcuni dei contributi piú rilevanti e significativi della letteratura esistente che si sono occupati di effettuare ricerca sul tema.

### 2.1 Motivazioni

Nel 1994, Nick Szabo, un informatico e crittografo, propose la prima descrizione ufficiale degli smart contracts [38]:

“Smart contracts combine protocols, users interfaces, and promises expressed via those interfaces, to formalize and secure relationships over public networks. This gives us new ways to formalize the digital relationships which are far more functional than their inanimate paper-based ancestors. Smart contracts reduce mental and computational transaction costs, imposed by either principals, third parties, or their tools.”

L’idea di base dietro uno smart contract è che molte clausole contrattuali possono essere incorporate in hardware e software con cui tutti i giorni interagiamo. Un primo esempio di antenato degli smart contracts possono essere considerati i distributori automatici, che erogano un bene (una bevanda) in cambio di un pagamento. Questo processo automatizzato e non richiede l’intervento di un intermediario. Il distributore automatico rappresenta un contratto con il portatore: chiunque abbia monete pu partecipare a uno scambio con il venditore. La cassetta di sicurezza e altri meccanismi di sicurezza proteggono le monete e il contenuto dagli attacchi, sufficientemente da permettere l’installazione redditizia di distributori automatici in una vasta gamma di aree.

### 2.1.1 Blockchain

Ad oggi, gli Smart Contracts hanno avuto un'ampissima diffusione grazie allo sviluppo e alla diffusione della tecnologia blockchain. La blockchain è una tecnologia che permette di costruire un ledger distribuito, cioè un registro condiviso e sincronizzato tra tutti i nodi della rete. Questo registro è immutabile e contiene tutte le transazioni che sono state effettuate. La blockchain è stata introdotta per la prima volta nel 2008 da un autore (o un gruppo di autori) sotto lo pseudonimo di Satoshi Nakamoto, come parte del progetto Bitcoin [25]. La blockchain, ha queste caratteristiche principali [52]:

- **Decentralizzazione:** al contrario dei sistemi di transazione centralizzati, in cui ogni transazione deve essere validata da un'autorità centrale, questo non avviene nella blockchain. In una blockchain, le transazioni sono validate da una rete di nodi distribuiti, che lavorano insieme per raggiungere un consenso sulla validità delle transazioni utilizzando un algoritmo di consenso.
- **Persistenza:** le transazioni registrate sulla blockchain sono immutabili e non possono essere modificate una volta che sono state confermate. I blocchi che contengono transazioni invalide vengono immediatamente scoperti e scartati dalla rete. Questo garantisce che il registro sia accurato e affidabile.
- **Anonimità:** ogni utente interagisce con la blockchain con un indirizzo generato, che non rivela la reale identità dell'utente. Questo garantisce un certo grado di anonimato e privacy. Allo stesso tempo, la blockchain non può garantire un anonimato totale.

A livello architetturale, la blockchain è una sequenza di blocchi, che tengono una lista completa di record di transazioni, come un ledger pubblico. Ogni blocco contiene un hash crittografico del blocco precedente, un timestamp e un set di transazioni. Questi blocchi sono concatenati insieme per formare una catena, da cui il nome "blockchain". Il primo blocco di una blockchain è chiamato *blocco genesi* ed è l'unico a non avere un blocco precedente. Ogni blocco successivo è collegato al blocco precedente e può avere solo un padre.

Le blockchain possono essere categorizzate in tre tipi principali [4]:

- **Blockchain pubbliche:** sono blockchain che chiunque nel mondo può leggere, inviare transazioni e controllare se le transazioni sono valide. Tutti i nodi della rete possono partecipare al processo di consenso e alla validazione delle transazioni. Queste blockchain vengono considerate totalmente decentralizzate. Un esempio di blockchain pubblica è Bitcoin.
- **Blockchain private:** sono blockchain in cui l'accesso ai permessi di scrittura è tenuto centralizzato ad una organizzazione. I permessi di lettura potrebbero essere

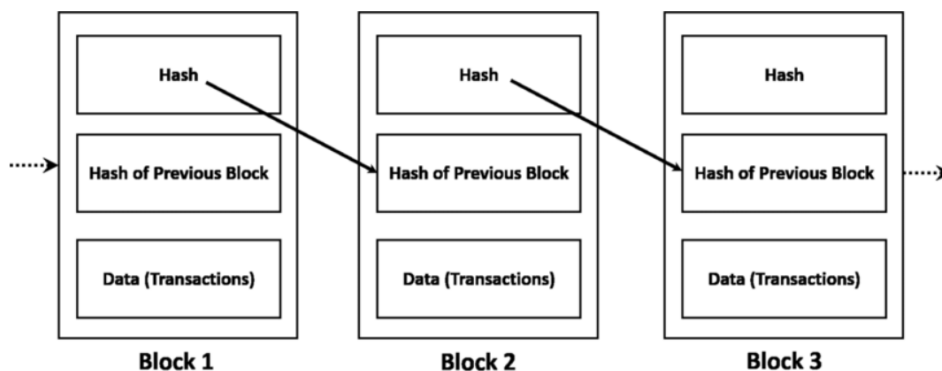


Figura 2.1: Esempio di architettura di una blockchain

pubblici o ristretti ad un gruppo selezionato di utenti. Un esempio di applicazioni di questo tipo possono essere quelle utilizzate in ambito aziendale.

- **Blockchain consorziate:** sono blockchain in cui il processo di consenso è controllato da un numero limitato di nodi; ad esempio si può pensare ad un consorzio di istituzioni finanziarie in cui ognuna opera come un nodo della rete e per raggiungere un consenso è necessario che la maggioranza dei nodi sia d'accordo. Queste blockchain vengono considerate parzialmente decentralizzate.

Una delle sfide principali della blockchain (ed in generale dei sistemi distribuiti) è il problema del consenso. Poiché nella blockchain non ci sono dei nodi centrali che garantiscano che i ledger nei nodi distribuiti siano tutti uguali, è necessario che ci sia un protocollo che assicuri che i ledger siano consistenti tra i vari nodi. Questo protocollo è chiamato protocollo di consenso. Esistono diversi protocolli di consenso, tra i principali possiamo citare:

- **Proof of Work (PoW):** il protocollo di consenso utilizzato da Bitcoin. Nel proof of work, i nodi della rete dimostrano che non siano dei malintenzionati spendendo una grande quantità di lavoro. Questo lavoro è fatto risolvendo un problema crittografico complesso. Nel PoW, ogni nodo della rete calcola l'hash del blocco, che deve per contenere un nonce ed essere più piccolo di un certo valore. Quando un nodo trova un hash che soddisfa questi requisiti, il blocco viene inviato a tutti gli altri nodi nella rete che devono confermare che il blocco sia valido. Questo processo è chiamato "mining" e i nodi che lo fanno sono chiamati "minatori". Quando un blocco viene confermato, il nodo che ha trovato il blocco riceve una ricompensa in criptovaluta.
- **Proof of Stake (PoS):** un protocollo di consenso alternativo a PoW. Poiché la PoW richiede una grande quantità di lavoro e di energia elettrica, è stato proposto un

protocollo di consenso alternativo che si basa sulla quantità di criptovaluta posseduta da un nodo. L'idea di base di PoS è che i nodi che possiedono una grande quantità di criptovaluta sono meno propensi a compiere azioni malevole, poiché ci potrebbe danneggiare il valore della criptovaluta che possiedono. In PoS, i nodi sono selezionati per validare i blocchi in base alla quantità di criptovaluta che possiedono. Poiché basarsi solo sulla quantità di criptovaluta posseduta potrebbe portare a una centralizzazione del processo di consenso, sono stati proposti diversi algoritmi per selezionare i nodi in modo casuale. Ad esempio, Blackcoin [42] utilizza un algoritmo di selezione casuale basato su una lotteria; Peercoin [51] utilizza un algoritmo di selezione casuale basato sulla quantità di criptovaluta posseduta oltre che sulla quantità di tempo a partire da cui la criptovaluta è stata posseduta. Al contrario di PoW, PoS non richiede una grande quantità di lavoro e di energia elettrica, rendendo il processo di consenso più efficiente e sostenibile, ma più il costo per il mining di un scende, più aumentano le probabilità di attacchi alla blockchain.

- **Delegated Proof of Stake (DPoS):** una variante di PoS in cui i possessori di criptovaluta possono votare per i nodi che desiderano che validino i blocchi. I nodi più votati vengono selezionati per validare i blocchi. Questo riduce il numero di nodi che devono essere coinvolti nel processo di consenso.

Questi protocolli sono solo alcuni dei tanti protocolli di consenso che sono stati proposti. Ogni protocollo ha i suoi vantaggi e svantaggi e può essere adatto a diversi contesti e applicazioni.

### 2.1.2 Ethereum

Tra le principali blockchain pubbliche, una delle più importanti è Ethereum. Ethereum è una piattaforma open-source basata su blockchain che permette di creare e distribuire applicazioni decentralizzate. Ethereum è stata proposta per la prima volta nel 2014 da Vitalik Buterin [48]. Ethereum è simile a Bitcoin, ma ha alcune differenze chiave, si può dire che Ethereum estende i concetti proposti da Bitcoin. Mentre Bitcoin è progettato principalmente per essere una valuta digitale, Ethereum è progettato per essere una piattaforma per la creazione di applicazioni decentralizzate. Ethereum ha una propria criptovaluta, chiamata Ether, che viene utilizzata per pagare le transazioni sulla rete. La blockchain di Ethereum è pubblica e permissionless, il che significa che chiunque può partecipare alla rete e inviare transazioni. Ethereum utilizza un protocollo di consenso chiamato Proof of Work, ma è in fase di transizione verso un protocollo di consenso chiamato Proof of Stake.

### 2.1.3 Smart Contracts

Una delle principali innovazioni di Ethereum è l'introduzione degli Smart Contracts. Gli smart contracts sono programmi che vengono memorizzati ed eseguiti su una blockchain, possono essere definiti come dei contenitori di codice che incapsulano e replicano i termini di contratti del mondo reale in un dominio digitale [39]. Essi agiscono come accordi che aiutano a scambiare denaro, proprietà, azioni o qualsiasi cosa di valore in modo trasparente, eliminando la necessità di un intermediario. Gli smart contracts sono eseguiti automaticamente quando vengono soddisfatte determinate condizioni. Ad esempio, un contratto di assicurazione potrebbe pagare automaticamente un risarcimento se si verifica un determinato evento. Poiché gli smart contracts sono accessibili ad entrambe le parti non ci sono dispute una volta che il contratto è stabilito.

Gli Smart Contracts Ethereum possono essere visti come degli agenti autonomi che vivono sulla blockchain Ethereum. Essi possono inviare e ricevere transazioni, memorizzare dati e interagire con altri contratti. Gli Smart Contracts sono scritti in un linguaggio di programmazione chiamato Solidity, che è stato progettato appositamente per la creazione di Smart Contracts. Solidity è un linguaggio di programmazione Turing-completo ad alto livello, progettato per essere eseguito sulla blockchain Ethereum. Gli Smart Contracts Ethereum sono eseguiti su una macchina virtuale chiamata Ethereum Virtual Machine (EVM). L'EVM è una macchina virtuale Turing-completa che esegue il codice Solidity e garantisce che il codice sia eseguito in modo deterministico e sicuro.

Poiché gli Smart Contracts vengono eseguiti sulla blockchain e sono Turing-completi sono soggetti all'Halting problem, cioè non è possibile sapere a priori se un'esecuzione di un contratto terminerà o meno. Questo renderebbe le Blockchain facilmente soggette a attacchi di tipo Denial of Service. Per evitare questo problema, Ethereum ha introdotto il concetto di gas. Il gas è una misura dell'uso delle risorse computazionali e di memoria di un contratto. Ogni operazione che un contratto esegue costa una certa quantità di gas. Gli utenti che inviano transazioni devono specificare il prezzo del gas che sono disposti a pagare per l'esecuzione della transazione. Se il gas fornito non è sufficiente per completare l'esecuzione del contratto, la transazione viene annullata e il gas speso non viene restituito all'utente. Al contrario, se l'utente consuma meno del massimo gas disponibile l'eccedenza viene restituita al proprietario. Questo meccanismo garantisce che i contratti non possano eseguire operazioni infinite e che gli utenti non possano abusare della rete Ethereum inviando transazioni che richiedono una grande quantità di risorse computazionali.

Gli Smart Contracts introducono, numerosi vantaggi [39]:

- **Risparmio:** utilizzando gli smart contracts, tempo e denaro spesi nell'attendere e pagare un soggetto terzo per processare una transazione sono eliminati.
- **Sicurezza e fiducia:** Una volta che le transazioni sono state cifrate e registrate sulla blockchain sono quasi impossibili da modificare. Questo poiché per modificare

una transazione necessario modificare l'intera catena, cosa che rende il lavoro dell'attaccante molto complicato. Allo stesso modo, gli smart contracts una volta pubblicati sono immutabili e non possono essere modificati, garantendo che le parti coinvolte possano fidarsi del contratto che hanno stipulato.

- **Accuratezza, efficienza e rapidità:** dal momento in cui le condizioni sono soddisfatte, il contratto viene eseguito immediatamente, eliminando la necessità di un intermediario e la necessità di compilare documentazione cartacea. Allo stesso modo, eliminando la documentazione cartacea si eliminano i tempi di attesa dovuti alla correzione di errori umani dovuti alla compilazione errata di parti dei documenti.

## 2.2 Vulnerabilit negli Smart Contracts

Poich gli Smart Contracts sono eseguiti su una blockchain pubblica e sono accessibili a tutti, importante garantire che siano sicuri e privi di vulnerabilit. Come precedentemente gi introdotto, una delle caratteristiche principali delli smart contracts la loro immutabilit. Una volta che un contratto stato pubblicato sulla blockchain, non pu essere modificato o cancellato. Questa propriet assicura che il comportamento del contratto sia prevedibile e che le parti coinvolte possano fidarsi del contratto. Tuttavia, questa propriet rende anche gli Smart Contracts vulnerabili a errori e vulnerabilit. Se un contratto contiene una vulnerabilit, non pu essere corretto e rimarr vulnerabile per sempre. Questo rende gli Smart Contracts un obiettivo attraente per gli attaccanti che possono sfruttare le vulnerabilit negli Smart Contracts per rubare fondi, bloccare i fondi o causare altri danni [45].

Le vulnerabilit negli Smart Contracts possono essere divise in diverse categorie ed esistono vari criteri di classificazione delle stesse. Una delle classificazioni pi comuni quella proposta da [40] che classifica le vulnerabilit in quattro categorie principali:

- **Security:** vulnerabilit che possono portare a perdite di fondi o a comportamenti inaspettati a seguito dell'interazione con un account o un contratto malevolo.
- **Funzionali:** problemi che causano la violazione delle specifiche funzionalit del contratto, per come esse erano state intese.
- **Operazionali:** vulnerabilit che possono portare a problemi operativi, come performance scarse e tempi di esecuzione lunghi.
- **Sviluppo:** problemi legati al codice sorgente del contratto, come codice di bassa qualit che lo rendono difficile da comprendere e migliorare.

Queste categorie non tengono in considerazione per, informazioni e conoscenze di dominio sugli Smart Contracts. Un'altra classificazione delle vulnerabilit quella proposta da [18]



che propone una classificazione basata su conoscenze di dominio sugli Smart Contracts. Ad esempio, poich gli smart contracts possono interagire con altri contratti e questa interazione pu portare a vulnerabilit come l'attacco di reentrancy o denial of service, queste vulnerabilit sono state classificate come vulnerabilit di tipo *inter-contractual*. Questa classificazione conta cinque categorie principali di vulnerabilit:

- **Inter-contractual**
- **Contractual**
- **Arithmetic**
- **Gas-Related**
- **Transactional**

Partendo da questa classificazione possibile identificare diversi tipi di vulnerabilit, pi e meno comuni, che possono essere presenti negli Smart Contracts. In questo lavoro di tesi le vulnerabilit sono state classificate in cinque classi diverse:

- **Reentrancy**
- **Unchecked-Calls**
- **Access-Control**
- **Arithmetic**
- **Others**

Di seguito, verranno presentate alcune delle vulnerabilit pi comuni e significative che possono essere presenti negli Smart Contracts, seguendo la classificazione utilizzata nel resto del lavoro ma con un occhio di riguardo alla classificazione proposta da [18].

### 2.2.1 Reentrancy

Le vulnerabilit di tipo reentrancy sono una delle vulnerabilit pi comuni e pericolose che possono essere presenti negli Smart Contracts e ricadono nella categoria di vulnerabilit *inter-contractual*.

La Reentrancy una classe di vulnerabilit presente negli SmartContracts che permette ad un malintenzionato di rientrare nel contratto in modo inaspettato durante l'esecuzione della funzione originale. Questa vulnerabilit pu essere utilizzata per rubare fondi e rappresenta la vulnerabilit pi impattante dal punto di vista di perdita di fondi a seguito di attacchi. Il caso pi famoso di questo attacco che lo ha anche reso noto il caso di The DAO [6], un contratto che ha subito un attacco di reentrancy che ha portato alla perdita

circa sessanta milioni di dollari in Ether, circa il 14% di tutti gli Ether in circolazione all'epoca. Nonostante dal 2016 ad oggi siano stati fatti numerosi progressi nelle tecnologie e nelle misure di sicurezza questa vulnerabilità rimane comunque una delle minacce più pericolose per gli SmartContracts, poiché negli anni questo tipo di attacchi si è ripresentato con notevole frequenza [29]. Un attacco di reentrancy può essere classificato in tre classi differenti [17, 53]:

- **Mono-Function:** la funzione vulnerabile è la stessa che viene chiamata più volte dall'attaccante, prima del completamento delle sue invocazioni precedenti. Questo è il caso più semplice di attacco reentrancy e di conseguenza il più facile da individuare.
- **Cross-Function:** questo caso è molto simile al caso di mono-function Reentrancy, ma in questo caso la funzione che viene chiamata dall'attaccante non è la stessa che fa la chiamata esterna. Questo tipo di attacco è possibile solo quando una funzione vulnerabile condivide il suo stato con un'altra funzione, risultando in una situazione fortemente vantaggiosa per l'attaccante.
- **Cross-Contract:** questo tipo di attacco prende piede quando lo stato di un contratto è invocato in un altro contratto prima che viene correttamente aggiornato. Avviene solitamente quando più contratti condividono una variabile di stato comune e uno di loro la aggiorna in modo non sicuro.

Mostreremo adesso alcuni esempi di contratti vulnerabili a questo tipo di attacco. Questo esempio mostra un contratto vulnerabile a un attacco di tipo mono-function:

```
// UNSECURE
function withdraw() external {
    uint256 amount = balances[msg.sender];
    (bool success,) = msg.sender.call{value: balances[msg.sender]}("");
    require(success);
    balances[msg.sender] = 0;
}
```

In questo caso, il balance dell'utente viene aggiornato solo dopo che la chiamata esterna è stata completata. Questo permette all'attaccante di chiamare la funzione withdraw più volte prima che il balance venga settato a zero, permettendo all'attaccante di rubare fondi allo smart contract. Una versione più complessa dello stesso processo è il caso cross function, di cui mostriamo un esempio:

```
// UNSECURE
function transfer(address to, uint amount) external {
    if (balances[msg.sender] >= amount) {
        balances[to] += amount;
        balances[msg.sender] -= amount;
    }
}
```

```

    }
}

function withdraw() external {
    uint256 amount = balances[msg.sender];
    (bool success,) = msg.sender.call{value: balances[msg.sender]}(
        "");
    require(success);
    balances[msg.sender] = 0;
}

```

In questo esempio, l'attaccante pu effettuare un attacco di tipo reentrancy avendo una funzione che chiama `transfer()` per trasferire fondi spesi prima che il bilancio sia settato a zero dalla funzione `withdraw()`. Gli attacchi Cross-contract sono anche detti Read-only Reentrancy, in cui l'attaccante invece di rientrare nello stesso contratto in cui i cambiamenti di stato sono stati fatti, rientra in un contratto che legge lo stato dal contratto originale. Un esempio di questo caso il seguente:

```

// UNSECURE
contract A {
    // Has a reentrancy guard to prevent reentrancy
    // but makes state change only after external call to sender
    function withdraw() external nonReentrant {
        uint256 amount = balances[msg.sender];
        (bool success,) = msg.sender.call{value: balances[msg.sender]}(
            "");
        require(success);
        balances[msg.sender] = 0;
    }
}

contract B {
    // Allows sender to claim equivalent B tokens for A tokens they
    // hold
    function claim() external nonReentrant {
        require(!claimed[msg.sender]);
        balances[msg.sender] = A.balances[msg.sender];
        claimed[msg.sender] = true;
    }
}

```

Come possibile vedere, nonostante entrambe le funzioni abbiano il modifier `nonReentrant`, comunque possibile per un attaccante chiamate `B.claim` durante la callback in `A.withdraw` e poich l'aggiornamento del bilancio dell'attaccante non stato ancora completato l'esecuzione ha successo.

## 2.2.2 Unchecked-Calls

Questa classe di vulnerabilit  ricade sempre nella categoria di vulnerabilit  inter-contractual ed   nota in letteratura anche come *mishandled exceptions*, *external-calls* ed *exceptions disorders*.

Questa vulnerabilit  si verifica quando un contratto chiama un funzioni di basso livello come `call`, `send`, `delegatecall` senza controllare il risultato di queste chiamate. La differenza tra queste funzioni e la funzione `transfer`   che quest'ultima propaga un'eccezione nel caso in cui venga generata un'eccezione nel contratto chiamate, al contrario le altre funzioni in caso di fallimento non generano un'eccezione ma ritornano il booleano `false` [35], che se non controllato adeguatamente non stoppa l'esecuzione del contratto [31]. Mostriamo ora un esempio di contratto che   stato reso protetto rispetto a questo tipo di vulnerabilit , semplicemente controllando il risultato della chiamata:

```
// Simple transfer of 1 ether
(bool success,) = to.call{value: 1 ether}("");
// Revert if unsuccessful
require(success);
```

## Access-Control

La vulnerabilit  di access control   una vulnerabilit  di tipo contrattuale. Questa vulnerabilit  si verifica quando un contratto non controlla correttamente l'accesso alle sue funzioni e ai suoi dati, quindi una vulnerabilit  legata al governante chi pu interagire con le varie funzionalit  all'interno del contratto. Un esempio di questo tipo di vulnerabilit  legato alla mancata restrizione dell'accesso a funzioni di inizializzazione, ad esempio:

```
function initContract() public {
    owner = msg.sender;
}
```

Questa funzione serve a inizializzare l'owner del contratto, ma non controlla chi pu chiamarla, permettendo a chiunque di chiamarla e diventare l'owner del contratto e non ha nemmeno controlli per prevenire la reinizializzazione. Questo   un esempio molto semplice di come una vulnerabilit  di access control possa portare a comportamenti inaspettati. Un famoso attacco che ha subito una vulnerabilit  di tipo access-control   il caso di Parity Multisig Wallet, un contratto che permetteva di creare wallet multi firma. Questo contratto ha subito un attacco nel Luglio 2017 che ha portato alla perdita di una grande quantit  di Ether. L'attacco   stato effettuato da un utente che ha sfruttato una vulnerabilit  di access control per diventare l'owner del contratto e rubare criptovalute ad altri utenti, si stima che la perdita sia stata di circa 30 milioni di dollari.

### 2.2.3 Arithmetic

Le vulnerabilit  di tipo aritmetico [18] sono vulnerabilit  che vengono generate come risultato di operazioni matematiche. Una delle vulnerabilit  pi  significative all'interno di questa classe   rappresentata dagli *underflow/overflow*, un problema molto comune nei linguaggi di programmazione. Incrementi di valore di una variabile oltre il valore massimo rappresentabile o decrementi al di sotto del valore minimo rappresentabile (detti *wrap around*) possono generare comportamenti indesiderati e risultati errati. In tutte le versioni di Solidity precedenti alla versione 0.8.0, le operazioni aritmetiche non controllano i limiti di overflow e underflow previsti per quel tipo di dato (es. uint64 o uint256), permettendo a un attaccante di sfruttare questa vulnerabilit  per ottenere un vantaggio. Ad esempio nel caso in cui si stia utilizzando un uint256 il massimo numero che si pu  memorizzare nella variabile    $2^{256} - 1$ , che   un numero molto alto, ma resta comunque possibile superare questo limite, facendo entrare in scena l'overflow. Quando si verifica un overflow, il valore della variabile riparte dal pi  piccolo valore rappresentabile. Questo pu  portare a comportamenti inaspettati e a perdite di fondi. Vediamo un esempio molto banale di contratto vulnerabile:

```
pragma solidity 0.7.0;

contract ChangeBalance {
    uint8 public balance;
    function decrease() public {
        balance--;
    }
    function increase() public {
        balance++;
    }
}
```

Questo codice rappresenta un contratto che molto semplicemente memorizza un saldo all'interno di una variabile di tipo uint8, cio  un intero a 8bit ovvero un intero che pu  memorizzare valori da 0 a  $2^8 - 1$ , quindi da 0 a 255. Se un utente chiamasse la funzione `increase()` in modo tale che faccia salire il valore del saldo a 256 il calcolo risulterebbe in un overflow e il valore della variabile ritornerebbe a 0. Questo   un esempio molto semplice di come un overflow possa portare a comportamenti inaspettati. L'underflow si verificherebbe nel caso diametralmente opposto, in cui viene chiamata la funzione `decrease()` quando il saldo   a 0. In questo caso il valore della variabile ritornerebbe a 255. Un esempio di attacco che sfrutta l'overflow   stato l'attacco del 23 Aprile 2018 effettuato su uno smart contract di BeautyChain (BEC) che ha causato un importantissimo crash del prezzo. La funzione che ha causato l'overflow permetteva di trasferire una certa somma di denaro presa in input a pi  utenti contemporaneamente e per farlo

controllava dapprima che il saldo del contratto fosse maggiore o uguale alla somma da trasferire:

```
function batchTransfer(address[] _receivers, uint256 _value)
public whenNotPaused returns (bool) {
    uint cnt = _receivers.length;
    uint256 amount = uint256(cnt) * _value;
    require(cnt > 0 && cnt <= 20);
    require(_value > 0 && balances[msg.sender] >= amount);

    balances[msg.sender] = balances[msg.sender].sub(amount);
    for (uint i = 0; i < cnt; i++) {
        balances[_receivers[i]] = balances[_receivers[i]].add
            (_value);
        Transfer(msg.sender, _receivers[i], _value);
    }
    return true;
}
```

Bec 图表

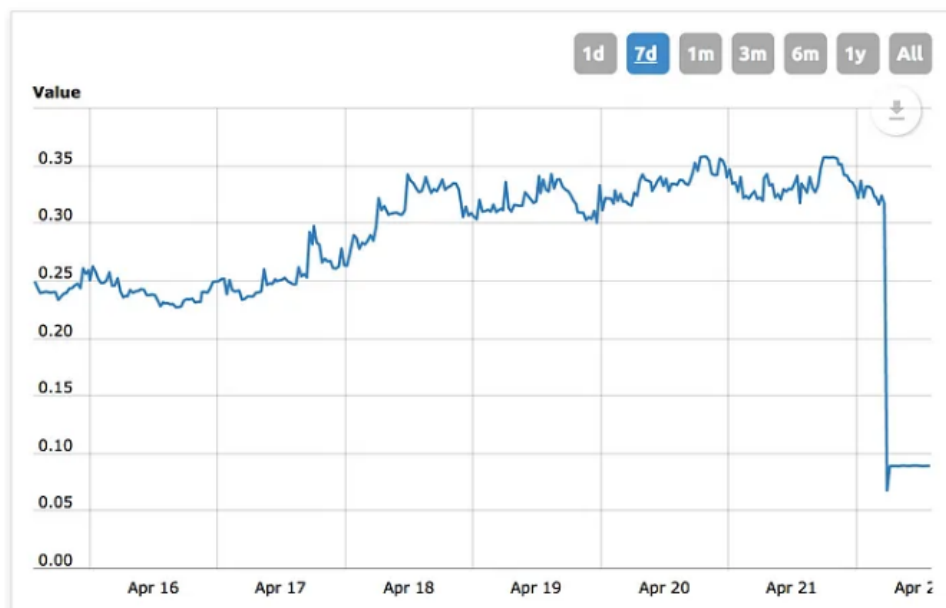


Figura 2.2: Andamento del prezzo di BEC prima e dopo l'attacco

Dalla versione di Solidity 8.0 tutti i calcoli che superano i limiti di rappresentazione del tipo di dato vengono interrotti e viene lanciata un'eccezione. Questo permette di evitare

che si verifichino overflow e underflow. Un'altra soluzione a questo tipo di errori è l'utilizzo della libreria SafeMath, che offre operazioni aritmetiche che controllano i limiti di rappresentazione del tipo di dato prima di effettuare i calcoli. Overflow e underflow sono le principali vulnerabilità di tipo aritmetico, ma non sono le uniche. Un'altra vulnerabilità di tipo aritmetico è rappresentata dalla divisione per zero. In Solidity nelle versioni precedenti alla 0.4 la divisione per zero non lancia un'eccezione, ma ritorna il valore 0, portando a comportamenti inaspettati e a perdite di fondi.

## 2.2.4 Other

In questa classe di vulnerabilità rientrano tutte quelle vulnerabilità che non fanno parte delle altre classi. Uno degli esempi sono le vulnerabilità di *uninitialized-state* che fanno capo a tutte quelle vulnerabilità a seguito di variabili che non vengono inizializzate correttamente. Le variabili in Solidity possono essere memorizzate in *memory*, *storage* o *calldata*. Bisogna assicurarsi che questi diversi storage vengano compresi e inizializzati correttamente, poiché ad esempio inizializzare male i puntatori allo storage o lasciarli non inizializzati può portare a degli errori. Da Solidity 0.5.0 i puntatori allo storage non inizializzati non sono più un problema poiché contratti con puntatori non inizializzati risulteranno in errori di compilazione.

### Incorrect-equality

Un'altra possibile vulnerabilità detta *incorrect-equality*. Questa vulnerabilità si verifica, solitamente, quando si controlla affinché un account ha abbastanza Ether o Tokens utilizzando una uguaglianza stretta, cioè qualcosa che un soggetto malevolo può facilmente manipolare per attaccare il contratto. Un esempio di questo tipo di vulnerabilità è il caso in cui il contratto entra in uno stato di *GridLock*:

```
/**
 * @dev          Locks up the value sent to contract in a new
 *              Lock
 * @param        term          The length of the lock up
 * @param        edgewareAddr  The bytes representation of the
 *              target edgeware key
 * @param        isValidator   Indicates if sender wishes to be a
 *              validator
 */
function lock(Term term, bytes calldata edgewareAddr, bool
    isValidator)
    external
    payable
    didStart
    didNotEnd
```

```

{
    uint256 eth = msg.value;
    address owner = msg.sender;
    uint256 unlockTime = unlockTimeForTerm(term);
    // Create ETH lock contract
    Lock lockAddr = (new Lock).value(eth)(owner, unlockTime);
    // ensure lock contract has all ETH, or fail
    assert(address(lockAddr).balance == msg.value); // BUG
    emit Locked(owner, eth, lockAddr, term, edgewareAddr,
        isValidator, now);
}

```

In questo caso la vulnerabilit  rappresentata dall'assert che controlla che il contratto abbia ricevuto la quantit  di Ether corretta. Il controllo si basa sull'assunzione che il contratto essendo creato alla riga precedente abbia saldo zero ed essendo precaricato proprio con *msg.value* si suppone che il saldo del contratto sia uguale a *msg.value*. In realt  gli Ether possono essere inviati ai contratti prima che vengano istanziati negli indirizzi stessi, poich  la generazione degli indirizzi dei contratti in Ethereum   un processo basato su dei nonce deterministici. L'attacco DoS che si basa su questa vulnerabilit  in questo caso consiste nel pre-calcolare l'indirizzo del contatto *Lock* e mandare dei Wei a quell'indirizzo. Questo forza la funzione *lock* a fallire e a non creare il contratto, bloccando il contratto in uno stato di *GridLock*. Per risolvere questa problematica, si potrebbe adottare l'approccio di sostituire l'uguaglianza stretta con un confronto maggiore o uguale.

## Denial of Service

Un'altra classe di vulnerabilit  che cade nella categoria di vulnerabilit  inter-contractual   la vulnerabilit  di tipo Denial of Service (DoS) [18]. Questa vulnerabilit  pu  avvenire per varie ragioni. Un esempio   il caso in cui si cerca di mandare fondi ad un contratto le cui funzionalit  dipendono dal successo del trasferimento di questi fondi. Se il trasferimento fallisce, il contratto potrebbe non essere in grado di eseguire le sue funzionalit  e rimanere bloccato. Un attaccante potrebbe sfruttare questo comportamento per bloccare il contratto inviando fondi con un contratto che non permette il trasferimento di fondi. Un esempio di questo tipo di vulnerabilit    il seguente:

```

// UNSECURE
contract Auction {
    address currentLeader;
    uint highestBid;

    function bid() payable {
        require(msg.value > highestBid);
    }
}

```



```

        require(currentLeader.send(highestBid)); // Refund
            the old leader, if it fails then revert

        currentLeader = msg.sender;
        highestBid = msg.value;
    }
}

```

In questo esempio qualora un'attaccante faccia l'a bid da uno smart contract con una funzione che annulla tutti i pagamenti, che quindi non pu essere rimborsato, il contratto Auction rimarrebbe bloccato e non potrebbe pi ricevere offerte. Questo un esempio molto semplice di come un attaccante possa sfruttare una vulnerabilit di tipo DoS per bloccare un contratto.

## Suicidal

Questa vulnerabilit presente in letteratura anche come *self-destruct*. Precedenti studi [26] classificano uno smart contract come Suicidal quando utilizza il comando *selfdestruct* senza controllare correttamente il suo utilizzo.

La vulnerabilit suicida degli smart contract un difetto critico che consente la terminazione prematura e irreversibile di un contratto sulla blockchain. Questa vulnerabilit si manifesta quando uno smart contract include una funzione che pu essere chiamata da utenti malintenzionati per auto-distuggere il contratto stesso.

La funzione **selfdestruct** in Solidity, ad esempio, stata progettata per consentire agli sviluppatori di rimuovere contratti obsoleti dalla blockchain e restituire i fondi residui a un indirizzo specificato. Tuttavia, se questa funzione non adeguatamente protetta o viene esposta accidentalmente, pu essere sfruttata per terminare il contratto e compromettere tutte le risorse associate. Per prevenire tale vulnerabilit, fondamentale implementare rigorosi controlli di accesso e assicurarsi che solo gli utenti autorizzati possano eseguire azioni di questa portata, oltre a condurre audit di sicurezza approfonditi prima del deployment del contratto sulla rete.

Un esempio di smart contract vulnerabile in Solidity il seguente:

```

pragma solidity ^0.8.0;

contract VulnerableContract {
    address payable owner;

    constructor() {
        owner = payable(msg.sender);
    }

    function destroy() public {

```

```

        selfdestruct(owner);
    }
}

```

In questo esempio, la funzione `destroy` pu essere chiamata da chiunque, causando la distruzione del contratto e il trasferimento dei fondi rimanenti all'indirizzo del proprietario. Per evitare questa vulnerabilit, la funzione `destroy` dovrebbe essere protetta con un controllo di accesso, come mostrato di seguito:

```

function destroy() public {
    require(msg.sender == owner, "Only the owner can destroy the contract");
    selfdestruct(owner);
}

```

## 2.3 Lavori Correlati

Il tema della rilevazione delle vulnerabilit all'interno degli Smart Contracts un tema che ha guadagnato notevole importanza nel tempo, anche a seguito della grande diffusione della tecnologia blockchain. Proprio per questo motivo, sono stati sviluppati e proposti diversi approcci per la rilevazione automatica di vulnerabilit all'interno degli Smart Contracts. In questo capitolo verranno presentati alcuni dei lavori pi significativi che si sono occupati di questo tema. Tra i principali approcci proposti figurano gli approcci basati su analisi statica basati su tecniche di esecuzione simbolica. L'analisi statica si basa sull'esame del codice sorgente o bytecode di uno smart contract senza effettuarne l'esecuzione effettiva. Questo approccio consente di identificare potenziali problematiche senza la necessit di testare il codice in un ambiente reale. L'esecuzione simbolica una tecnica particolarmente potente in questo contesto in quanto consente di esplorare tutte le possibili esecuzioni del programma, consentendo di individuare vulnerabilit che potrebbero emergere solo in determinate condizioni. Gli approcci basati su esecuzione simbolica cercano di risolvere queste vulnerabilit attraverso la generazione di un grafo di esecuzione simbolico, in cui le variabili sono rappresentate come simboli e le esecuzioni possibili del programma vengono esplorate simbolicamente. Ci consente di identificare percorsi di esecuzione che potrebbero condurre a condizioni di errore o vulnerabilit. Tuttavia, va notato che l'analisi statica, inclusa l'esecuzione simbolica, pu essere complessa e non sempre completa. Alcune vulnerabilit potrebbero sfuggire a questa analisi o richiedere ulteriori tecniche di verifica. Pertanto, consigliabile combinare l'analisi statica con altre metodologie, come l'analisi dinamica e i test formali, per garantire una copertura completa nella rilevazione di vulnerabilit negli smart contract. Tra i principali strumenti che utilizzano questo tipo di analisi ci sono Maian [27, 24], Oyente [2, 21], Mythril [1], Manticore [23] e altri. Un'altro tipo di approcci ad analisi

statica sono i tools basati su regole. Questi strumenti usano un set di regole predefinite e pattern per identificare delle potenziali vulnerabilit  nel codice sorgente. Questi tool analizzano il codice sorgente e segnalano tutte le istanze dove il codice viola delle regole predefinite. Le regole sono tipicamente basate su delle vulnerabilit  note e delle best practice di programmazione, come ad esempio evitare dei buffer overflow, usare algoritmi di cifratura sicuri e validare propriamente l'input degli utenti. La limitazione principale di questi strumenti   che i risultati che producono sono limitati al set di regole che   stato implementato, quindi non riescono a riconoscere delle nuove vulnerabilit  o vulnerabilit  non scoperte precedentemente. Inoltre, un'altra grande limitazione di questi strumenti   il fatto che possano produrre un alto numero di falsi positivi, cio  di situazioni in cui il codice viene segnalato come codice vulnerabile ma in realt  il codice   perfettamente sano. Tra i principali strumenti che utilizzano questo tipo di analisi ci sono Slither [10], Securify [41], SmartCheck [40] e altri. Un'altra categoria di strumenti per la rilevazione di vulnerabilit  negli smart contract sono gli approcci basati su tecniche di Machine Learning e Deep Learning, tra le quali anche il lavoro di questa tesi va ad inserirsi. Un approccio basato sulla trasformazione degli opcode dei contratti e la sua relativa analisi con dei modelli di Machine Learning tradizionale   stato offerto da Wang et al. [44] i quali hanno raggiunto risultati eccellenti, con risultati in termini di F1 Score superiori al 95% in quasi tutte le classi prese in analisi con il modello XGBoost che   risultato il miglior modello. Un altro lavoro che sfrutta tecniche di Machine Learning pi  tradizionali   il lavoro di Mezina e Ometov che hanno utilizzato classificatori come RandomForest, LogisticRegression, KNN, SVM in un approccio dapprima binario (valutare se il contratto abbia o meno delle vulnerabilit ) e poi multiclasse (valutare quale tipo di vulnerabilit  il contratto abbia) [22]. I risultati in questo caso hanno mostrato come il modello SVM sia quello che ottiene i migliori risultati in termini di accuratezza.

Spostandoci su lavori che utilizzano tecniche di Deep Learning   importante citare un'altro lavoro effettuato sullo stesso dataset su cui   basato questo lavoro di tesi. Questo dataset   stato infatti raccolto e pubblicato da un gruppo di ricercatori dell'Universit  di Bologna che ha effettuato un primo studio utilizzando un approccio basato su reti neurali convoluzionali [33]. L'approccio in questo caso   stato quello di classificare le vulnerabilit  in un'impostazione multilabel del problema (in cui la label da predire   un array di elementi, quindi in cui il contratto pu  appartenere contemporaneamente a pi  classi) utilizzando delle reti neurali convoluzionali per la rilevazione delle vulnerabilit  trasformando in codice Bytecode espresso in esadecimale dei contratti in delle immagini RGB. Questo lavoro ha come risultato principale la dimostrazione che utilizzando delle reti neurali convoluzionali   possibile rilevare le vulnerabilit  presenti negli SmartContracts con delle buone performance, i migliori risultati si attestano con un MicroF1 score del 0.83% e mostrano come i migliori risultati siano dati da delle reti Resnet con delle convoluzioni unidimensionali. Successivamente, gli stessi autori hanno pubblicato una seconda analisi effettuata sul dataset utilizzando nuovi classificatori come CodeNet, SvinV2-T e Inception, mostrando come i migliori risultati continuino ad essere quelli forniti da reti

convoluzionali unidimensionali [?]. Altri lavori che utilizzano un approccio basato su tecniche di Deep Learning il lavoro proposto da Huang [14] che utilizza anch'egli delle reti neurali convoluzionali per la rilevazione delle vulnerabilit . I modelli utilizzati sono modelli molto noti come Alexnet, GoogleNet e Inception v3, i risultati migliori in questo caso si attestano sul 75%. Un importante lavoro offerto da Deng et Al. [7] ha proposto un approccio basato sulla fusione di feature multimodali, analizzando contemporaneamente codice sorgente, bytecod e grafi di controllo del flusso. Per ognuna di queste tre feature stato trainato un semplice classificatore con una rete neurale feedforward e sono poi state combinate le predizioni di questi tre classificatori in un classificatore finale utilizzando un approccio di ensemble learning detto stacking. I risultati ottenuti mostrano come l'approccio proposto abbia ottenuto dei risultati migliori rispetto ad un approccio in cui si utilizzava solo una delle tre feature.

# Capitolo 3

## Metodologia

Questa sezione descrive in dettaglio l'approccio seguito per affrontare il problema della classificazione degli smart contracts. Questo capitolo è fondamentale per comprendere come sono stati raccolti, pre-processati e utilizzati i dati, quali e come sono stati configurati e addestrati i modelli e quali strumenti e tecniche sono stati impiegati per ottenere i risultati presentati.

La metodologia adottata in questa tesi è suddivisa nelle seguenti fasi principali:

1. Raccolta e preparazione dei dati: esplorazione del dataset utilizzato, delle tecniche di pre-processing applicate e delle modalità di suddivisione dei dati per l'addestramento e la valutazione.
2. Modellazione: descrizione dell'architettura dei modelli utilizzati, delle scelte di configurazione e delle strategie di addestramento.

Ogni fase sarà trattata in modo dettagliato, evidenziando le scelte metodologiche compiute e le motivazioni alla base di tali scelte. Questo approccio sistematico garantisce trasparenza e replicabilità del lavoro svolto, consentendo ad altri di comprendere e, eventualmente, replicare i risultati ottenuti.

### 3.1 Esplorazione dei dati

La prima fase, quando ci si approccia ad un problema che riguarda la costruzione di modelli e l'analisi di dati, sicuramente è l'analisi esplorativa dei dati. Questa fase è fondamentale per comprendere meglio la struttura del dataset e dei contratti da classificare, per individuare eventuali problemi e per ottenere una visione d'insieme dei dati. A livello pratico, questa fase di analisi esplorativa dei dati è stata eseguita utilizzando il linguaggio Python, con l'ausilio di librerie come Pandas, NumPy, Matplotlib e Seaborn per l'analisi e la visualizzazione dei dati.

Il dataset [32] utilizzato in questo progetto è un dataset disponibile pubblicamente sulla piattaforma HuggingFace. Hugging Face è una piattaforma e una comunità dedicata all'intelligenza artificiale, nota soprattutto per la sua vasta raccolta di modelli pre-addestrati per il linguaggio naturale, computer vision e altri compiti legati all'IA. È diventata una risorsa fondamentale per gli sviluppatori e i ricercatori che lavorano nell'ambito del machine learning grazie alla sua libreria di trasformatori denominata "Transformers" (che verrà utilizzata in questo lavoro), che offre un'implementazione semplice e potente di alcuni dei modelli più avanzati nel campo del NLP (Natural Language Processing). Hugging Face non solo fornisce modelli pre-addestrati, ma incoraggia anche la collaborazione e la condivisione all'interno della comunità attraverso il suo hub online, dove gli utenti possono accedere, condividere e collaborare su modelli, dataset e altri componenti relativi all'IA. Inoltre, Hugging Face supporta un ecosistema di strumenti e risorse open-source che facilitano lo sviluppo e l'implementazione di soluzioni basate su IA.

Questo dataset contiene informazioni su ben 106.474 Smart Contracts pubblicati sulla rete Ethereum. Il dataset è stato costruito a partire dalla lista Smart Contracts verificati forniti da Smart Contract Sanctuary, una risorsa online che fornisce una lista verificata di Smart Contracts. Successivamente, il codice sorgente dei contratti intelligenti è stato scaricato sia dal suddetto repository che tramite Etherscan e poi appiattito utilizzando lo strumento di appiattimento dei contratti Slither. Il bytecode è stato scaricato utilizzando la libreria Web3.py, in particolare la funzione `web3.eth.getCode()`. Infine, ogni Smart Contract è stato analizzato utilizzando il framework di analisi statica Slither. Lo strumento ha individuato 38 diverse classi di vulnerabilità nei contratti raccolti e sono stati quindi mappati su 6 etichette. Questi mapping sono stati derivati seguendo le linee guida del Decentralized Application Security Project (DASP) e del Smart Contract Weakness Classification Registry. Sono stati anche ispirati dai mapping utilizzati per la rilevazione di Slither dal team che ha etichettato il dataset SmartBugs Wild, che può essere trovato qui. Ogni entry del dataset è composta da quattro feature:

- **Address:** l'indirizzo del contratto
- **SourceCode:** il codice sorgente del contratto, scritto in linguaggio Solidity
- **ByteCode:** il codice bytecode del contratto in esadecimale, ottenuto a partire dalla compilazione del codice sorgente utilizzando il compilatore di Solidity. Questo bytecode è quello che viene eseguito sulla macchina virtuale di Ethereum (EVM).
- **Slither:** il risultato dell'analisi statica del contratto con Slither, un tool open-source per l'analisi statica di contratti scritti in Solidity. Questo risultato è un array di valori che vanno da 1 a 5, dove ogni numero rappresenta la presenza di una vulnerabilità e 4 rappresenta un contratto safe, cioè privo di vulnerabilità.

Le vulnerabilità che sono state prese in questo lavoro sono le seguenti:

- Access-Control
- Arithmetic
- Other
- Reentrancy
- Unchecked-Calls

Il dataset è diviso in tre sottoinsiemi: training, validation e test set. Il dataset di training è composto da 79.641 contratti, il dataset di validazione da 10.861 contratti e il dataset di test da 15.972 contratti. La tabella 3.1 riassume in termini percentuali la suddivisione dei dati nei tre set.

Split	Numero di elementi	Percentuale
Training	79,641	74.80%
Validazione	10,861	10.20%
Test	15,972	15.00%

Tabella 3.1: Percentuali di ogni split rispetto al totale

Tutte le informazioni sono presenti per tutti i contratti tranne l'informazione relativa al bytecode, che risulta essere assente per pochissimi contratti come visibile nella Tabella 3.2. Non ci sono valori nulli nelle altre colonne del dataset.

Dataset	Count	%
Train	227	0.285%
Test	51	0.319%
Validation	30	0.276%

Tabella 3.2: Conteggio e Percentuale di Contratti Senza Bytecode per Dataset

### 3.1.1 Analisi delle Lunghezze dei contratti

Per ottenere una visione d'insieme delle lunghezze dei contratti, abbiamo calcolato la lunghezza media del source code e del bytecode. Prima del preprocessing le lunghezze medie di SourceCode e ByteCode sono rispettivamente di 3155 token e 8114 token. Abbiamo visualizzato la distribuzione delle lunghezze del source code utilizzando un istogramma. Per migliorare la leggibilità del grafico, abbiamo raggruppato i dati per quanto riguarda il source code in intervalli di 500 token. L'istogramma è accompagnato da

una linea che indica la lunghezza media dei token rappresentata con una linea tratteggiata rossa.

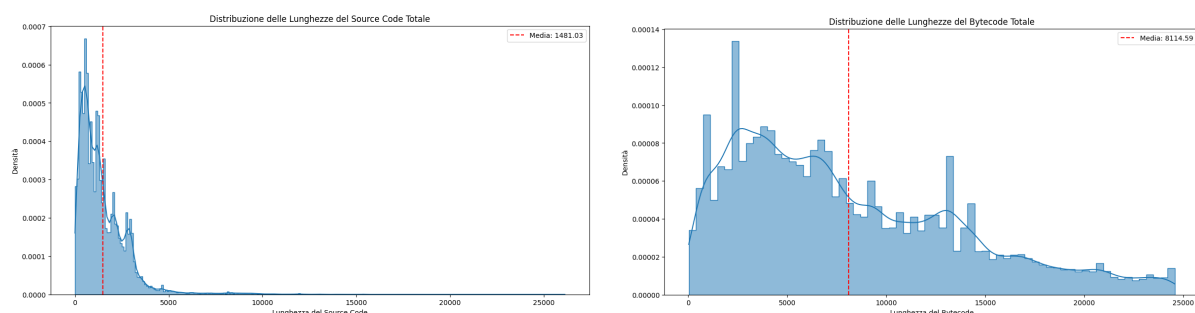
L'inclusione delle lunghezze medie fornisce un punto di riferimento utile per interpretare le distribuzioni e confrontare i singoli esempi di codice rispetto alla media del dataset. Queste analisi sono fondamentali per le successive fasi di preprocessing e modellazione, garantendo che i modelli possano gestire efficacemente la variabilit  presente nei dati.

Sul bytecode non   stato applicato nessun tipo di preprocessing per ridurre la dimensione dei dati, poich  essendo il codice esadecimale prodotto direttamente dal compilatore Solc di Solidity, esso   gi  nella forma pi  compatta possibile e non richiede ulteriori operazioni di riduzione delle dimensioni. .

Al contrario, per quanto riguarda il codice sorgente sono stati eliminati tutti i commenti e le funzioni getter monoistruzione, cio  tutte quelle funzioni `getX()` le quali abbiano come unica istruzione una istruzione di return, poich  sono state assunte come funzioni corrette. L'eliminazione di queste stringhe   avvenuta tramite una ricerca delle stringhe effettuata con una regex.

Abbiamo unito i set di dati di addestramento, test e validazione in un unico DataFrame per analizzare le lunghezze del source code e del bytecode. In particolare, sono state calcolate rispettivamente le lunghezze del codice sorgente e del bytecode. Effettuando le rimozioni dei commenti la media del numero di token del sourcecode scende a 1511 token, mostrando come la rimozione dei commenti abbia un grande impatto sulla lunghezza media del codice. Rimuovendo anche le funzioni getter monoistruzione la lunghezza media del source code scende a 1481 token. La distribuzione delle lunghezze del source code e del bytecode   mostrata rispettivamente nelle Figure 3.1a e 3.1b.

Poich  successivamente andremo a classificare i contratti con dei modelli nella famiglia



(a) Distribuzione delle Lunghezze del Source Code dopo il preprocessing

(b) Distribuzione delle Lunghezze del Bytecode dopo il preprocessing

Figura 3.1: Distribuzioni delle lunghezze del source code e del bytecode.

BERT che prendono in input sequenze di token lunghe al massimo 512 token abbiamo calcolato la percentuale di contratti che non superano questa soglia e in alcuni suoi mul-



tipi, per capire quanti contratti riusciamo a classificare per intero e quanti verranno invece troncati. I risultati sono mostrati nella Tabella 3.3.

Metrica	Sotto 512	Sotto 1024	Sotto 1536	Media
Source Code (%)	21.90	46.04	64.77	62.21
Bytecode (%)	1.56	6.31	8.75	58.69

Tabella 3.3: Percentuale di contratti sotto varie lunghezze in token.

Diventa per importante notare, che per molti casi di contratti che superano i 5000 token questi sono cos lunghi poich riportano in calce al contratto anche il codice sorgente di librerie esterne, che non sono di interesse per la classificazione delle vulnerabilit.

### 3.1.2 Distribuzione delle Classi e Matrici di Co-occorrenza

Successivamente, la fase di esplorazione dei dati ha previsto l'analisi delle classi di vulnerabilit dei dati. In questa sezione, presentiamo la distribuzione delle classi e le matrici di co-occorrenza per i dataset di addestramento, test e validazione. Si precisa che i risultati di seguito proposti si riferiscono gi al dataset da cui sono stati sottratti i contratti privi di bytecode.

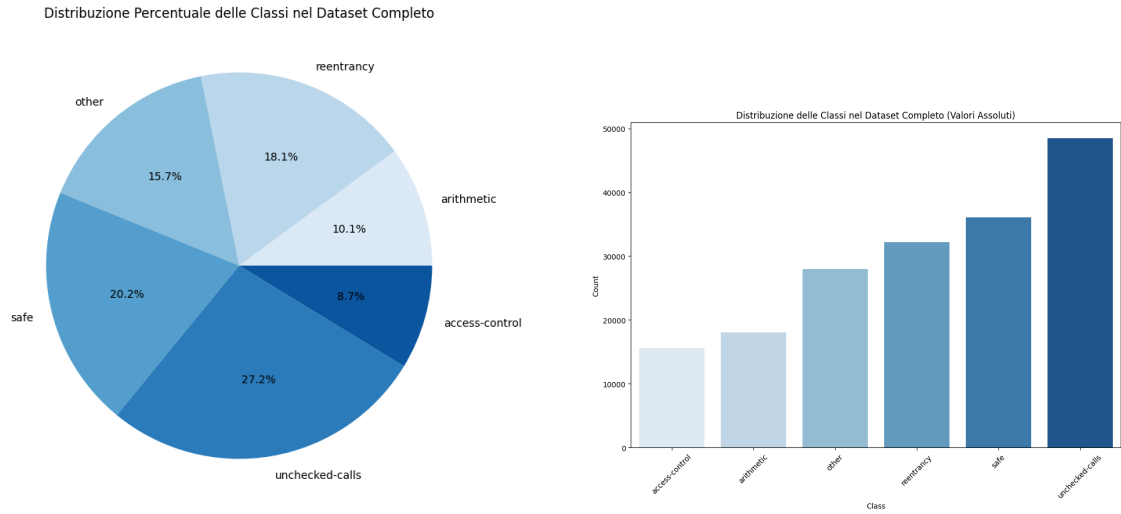
#### Distribuzione delle Classi

La Tabella 3.4 mostra la distribuzione delle classi per i tre dataset. evidente che la classe 'unchecked-calls' la pi frequente in tutti e tre i dataset, mentre la classe 'access-control' la meno rappresentata.

Class	Train		Test		Validation		Full	
	Count	%	Count	%	Count	%	Count	%
access-control	11619	8.71%	2331	8.71%	1588	8.73%	15538	8.72%
arithmetic	13472	10.10%	2708	10.12%	1835	10.09%	18015	10.10%
other	20893	15.67%	4193	15.67%	2854	15.69%	27940	15.67%
reentrancy	24099	18.07%	4838	18.09%	3289	18.08%	32226	18.08%
safe	26979	20.23%	5405	20.20%	3676	20.21%	36060	20.23%
unchecked-calls	36278	27.21%	7276	27.20%	4951	27.21%	48505	27.21%

Tabella 3.4: Distribuzione delle Classi nei Dataset di Addestramento, Test, Validazione e Completo

Le Figure 3.2a e 3.2b mostrano rispettivamente la distribuzione percentuale e assoluta delle classi nell'intero dataset. Queste visualizzazioni forniscono una panoramica chiara della frequenza delle diverse classi all'interno del dataset, evidenziando le differenze di



(a) Distribuzione Percentuale delle Classi

(b) Distribuzione Assoluta delle Classi

Figura 3.2: Distribuzioni delle Classi nell'intero dataset, in termini relativi e assoluti.

distribuzione tra le classi. Dalla distribuzione delle classi nei diversi dataset, possiamo osservare che:

- Le classi sono distribuite in modo abbastanza uniforme nei dataset di addestramento, test e validazione, con percentuali simili tra i tre split per classe
- La classe 'unchecked-calls' la pi frequente in tutti e tre i dataset.
- La classe 'access-control' la meno frequente.
- Le classi 'safe' e 'reentrancy' sono anche abbastanza rappresentate

### Matrici di Co-occorrenza

Le Tabelle 3.3, 3.4 e 3.5 mostrano le matrici di co-occorrenza per i dataset di addestramento, test e validazione rispettivamente. Le matrici di co-occorrenza indicano la frequenza con cui ogni coppia di classi appare insieme nello stesso elemento.

In questa sezione, vengono presentate le matrici di co-occorrenza per ogni split del dataset, mostrando sia in termini assoluti che relativi il numero di cooccorrenze tra le varie classi.

Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Addestramento

access-control	11619 33.74%	3256 9.46%	4636 13.46%	7261 21.09%	0 0.0%	7660 22.25%
arithmetic	3256 8.74%	13472 36.17%	6230 16.72%	7362 19.76%	0 0.0%	6931 18.61%
other	4636 8.5%	6230 11.42%	20893 38.29%	9347 17.13%	0 0.0%	13462 24.67%
reentrancy	7261 11.07%	7362 11.22%	9347 14.25%	24099 36.74%	0 0.0%	17521 26.71%
safe	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	26979 100.0%	0 0.0%
unchecked-calls	7660 9.36%	6931 8.47%	13462 16.45%	17521 21.41%	0 0.0%	36278 44.32%
	access-control	arithmetic	other	reentrancy	safe	unchecked-calls

Classe

Figura 3.3: Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Addestramento

Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Test

access-control	2331 33.73%	654 9.46%	932 13.49%	1458 21.1%	0 0.0%	1535 22.21%
arithmetic	654 8.74%	2708 36.17%	1253 16.74%	1478 19.74%	0 0.0%	1393 18.61%
other	932 8.5%	1253 11.43%	4193 38.25%	1880 17.15%	0 0.0%	2705 24.67%
reentrancy	1458 11.07%	1478 11.22%	1880 14.27%	4838 36.73%	0 0.0%	3517 26.7%
safe	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	5405 100.0%	0 0.0%
unchecked-calls	1535 9.34%	1393 8.48%	2705 16.47%	3517 21.41%	0 0.0%	7276 44.3%
	access-control	arithmetic	other	reentrancy	safe	unchecked-calls

Classe

Figura 3.4: Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Test

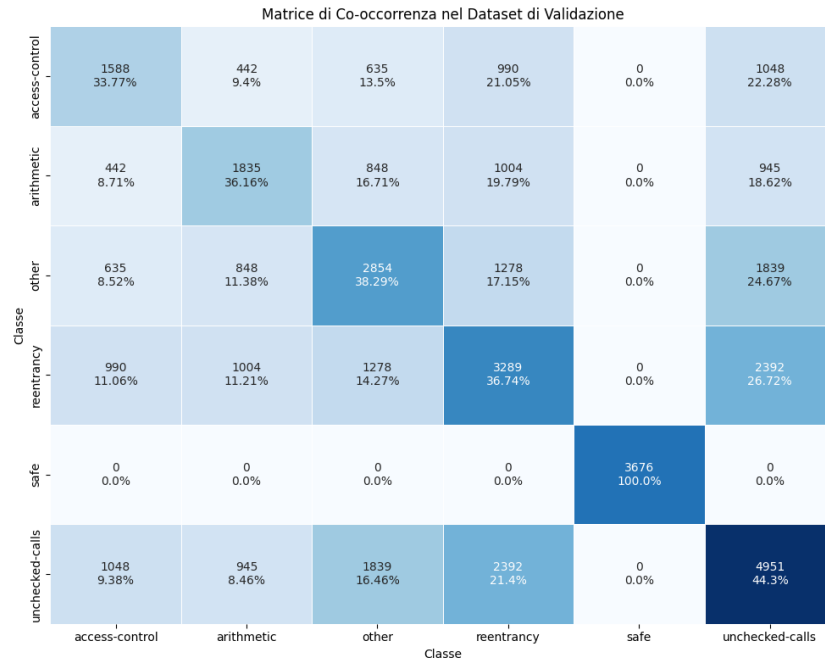


Figura 3.5: Matrice di Co-occorrenza nel Dataset di Validazione

Analizzando le matrici di co-occorrenza, notiamo che:

- La classe `safe`, che rappresenta i contratti privi di vulnerabilit , correttamente non appartiene contemporaneamente a nessuna delle altre classi.
- Le classi `'unchecked-calls'` co-occorrono frequentemente con `'reentrancy'`, `'other'`, e `'access-control'`. Questo suggerisce che i contratti con chiamate non verificate spesso presentano anche altri tipi di vulnerabilit .
- Le classi `'arithmetic'` e `'reentrancy'` mostrano una co-occorrenza significativa, suggerendo che le vulnerabilit  aritmetiche possono spesso essere associate a problemi di rientro.

Si analizzata a questo punto, la percentuale di volte, per ogni classe, per cui la classe stessa appariva non come unica vulnerabilit  presente, ma il contratto avesse almeno un'altra vulnerabilit . I risultati sono mostrati nella Tabella 3.5.

Interessante il risultato relativo alla classe `Reentrancy`, che pur non essendo la classe pi  presente all'interno del dataset, quella che pi  frequentemente appare in concomitanza con altre classi di vulnerabilit . Questi risultati evidenziano l'importanza di considerare la co-occorrenza delle classi quando si analizzano le vulnerabilit  negli smart contracts, poich  molte vulnerabilit  non si verificano in isolamento ma tendono a manifestarsi insieme ad altre.

<b>Vulnerabilit</b>	<b>%</b>
unchecked-calls	72.32%
reentrancy	91.51%
other	84.17%
arithmetic	77.05%
access-control	87.27%

Tabella 3.5: Percentuale dnelle classi in cui la classe stessa non l’unica vulnerabilit presente.

## 3.2 Modellazione

In questa sezione, descriviamo l’architettura dei modelli utilizzati per la classificazione degli Smart Contracts. In particolare, presentiamo i dettagli relativi ai modelli BERT utilizzati, alle scelte di configurazione e alle strategie di addestramento. Come si evince dalla sezione precedente le feature su cui i modelli dovranno basare le loro predizioni sono il codice sorgente e il bytecode dei contratti, cio dati di natura testuale. La natura dei dati fa s che problema possa essere affrontato efficacemente utilizzando tecniche di elaborazione del linguaggio naturale (NLP, Natural Language Processing).

### 3.2.1 Natural Language Processing, NLP

L’Elaborazione del Linguaggio Naturale (NLP, da *Natural Language Processing*) un campo di studi interdisciplinare che combina linguistica, informatica e intelligenza artificiale. Si occupa dell’interazione tra computer e linguaggio umano (naturale), in particolare del processamento, analisi e costruzione di modelli riguardanti grandi quantit di dati linguistici naturali [16]. Le due grandi sfide dell’NLP si possono riassumere in due grandi aree di ricerca: la comprensione del linguaggio e la generazione del linguaggio.

La comprensione del linguaggio comprende compiti come l’analisi sintattica, l’analisi semantica, il riconoscimento delle entit nominate e la risoluzione delle coreferenze. Questi compiti sono cruciali per la conversione del linguaggio naturale in una rappresentazione formale che le macchine possano elaborare. L’analisi sintattica, ad esempio, mira a determinare la struttura grammaticale di una frase, mentre l’analisi semantica si concentra sulla comprensione del significato del testo.

In secondo luogo, la generazione del linguaggio riguarda la produzione automatica di testo, che pu includere la sintesi vocale, la traduzione automatica e la generazione di risposte automatiche in chatbot. Questo aspetto dell’NLP fondamentale per creare sistemi che non solo comprendano il linguaggio umano, ma che possano anche comunicare in modo naturale e coerente con gli utenti.

Negli ultimi anni, il campo dell’NLP ha fatto enormi progressi passando dall’epoca delle schede perforate e dell’elaborazione batch (in cui l’analisi di una frase poteva ri-

chiedere fino a 7 minuti) all'era di Google e simili (in cui milioni di pagine web possono essere elaborate in meno di un secondo) [5], sino ad arrivare ai giorni d'oggi con l'avvento di modelli di deep learning. Per decenni, l'approccio alla ricerca nel campo dell'NLP prevedeva l'utilizzo di modelli shallow come SVM [9] e regressione logistica [30] allenati su feature sparse e fortemente multidimensionali. Negli ultimi anni, d'altro canto, le reti neurali basati su rappresentazioni di vettori densi hanno prodotto risultati superiori su una grande vastità di task diversi nel mondo dell'NLP [50]. Lo stato dell'arte attuale nell'NLP in molti task rappresentato dall'introduzione di una nuova architettura, che andata a sostituire i precedenti modelli RNN e LSTM [12] tradizionali, ovvero i modelli basati su Transformers, introdotti per la prima volta nel paper "Attention is All You Need" da Vaswani et al. nel 2017 [43]. I Transformer hanno rivoluzionato il campo grazie al meccanismo di self-attention, che consente al modello di valutare e ponderare l'importanza di ogni parola in una frase rispetto alle altre parole della stessa frase, indipendentemente dalla loro distanza posizionale. Questo approccio permette un'elaborazione parallela dei dati, in netto contrasto con la natura sequenziale delle RNN e degli LSTM, migliorando notevolmente l'efficienza computazionale. La struttura dei Transformer organizzata in blocchi ripetuti di encoder e decoder, dove l'encoder elabora l'input costruendo una rappresentazione interna, e il decoder utilizza questa rappresentazione per generare l'output. Questa architettura ha dimostrato prestazioni eccezionali in molte applicazioni di NLP, tra cui la traduzione automatica, la comprensione e la generazione del linguaggio, la sintesi del testo e il riassunto automatico. Dall'architettura dei Transformer sono derivati molti modelli di successo, tra cui i modelli BERT, la famiglia di modelli GPT e tanti altri modelli diventati oggi lo stato dell'arte nei vari task del mondo dell'NLP.

Di seguito illustreremo i tre modelli che sono stati utilizzati in questo lavoro, ovvero BERT, CodeBERT e DistilBERT, tutti basati sull'architettura dei Transformer.

### 3.2.2 BERT, Bidirectional Encoder Representations from Transformers

Il modello BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) stato presentato da Devlin et al. nel 2018 [8]. BERT un modello di deep learning pre-addestrato per l'elaborazione del linguaggio naturale. BERT stato allenato su un corpus di testo molto ampio, comprendente 3.3 miliardi di parole, utilizzando due task di apprendimento supervisionato: il *Masked Language Model* (MLM) e il *Next Sentence Prediction* (NSP). Il Masked Language Model maschera randomicamente alcuni dei token in input e l'obiettivo del modello quello di predire l'id nel vocabolario della parola mascherata basandosi solo sul contesto che la circonda, considerando sia il contesto a sinistra che a destra della parola mascherata, in modo da catturare il contesto bidirezionale. Il Next Sentence Prediction, invece, prevede se una frase la successiva rispetto

a un'altra frase. Questo task è stato introdotto per insegnare al modello a comprendere il contesto e la coerenza tra le frasi. Al momento della sua pubblicazione BERT rappresentava lo stato dell'arte in ben undici diversi task nel campo dell'NLP ed è stato il primo modello a raggiungere state-of-the-art performance in molti task sentence-level e token-level, superando anche molte architetture specifiche per task.

## Architettura

L'architettura del modello BERT è un encoder bidirezionale multi-strato basato sui Transformer, come descritto nell'implementazione originale di Vaswani et al. (2017) [43]. I parametri principali di un'architettura di BERT sono il numero di strati  $L$ , la dimensione nascosta  $H$  e il numero di self-attention heads  $A$ . All'interno dell'architettura di BERT, due concetti fondamentali sono la *hidden size* e le *attention heads*.

La **hidden size** ( $H$ ) si riferisce alla dimensione dei vettori di rappresentazione nelle varie fasi di elaborazione del modello. In termini pratici, rappresenta la dimensionalità dello spazio in cui le rappresentazioni intermedie dei token vengono proiettate durante l'elaborazione nel modello Transformer. Questa dimensione influisce direttamente sulla capacità del modello di catturare le informazioni a partire dai dati in input; una hidden size maggiore consente al modello di rappresentare e processare informazioni più dettagliate, a costo però di un incremento dei requisiti computazionali.

Le **attention heads** ( $A$ ) sono un componente cruciale del meccanismo di self-attention nei Transformer. Ogni attention head esegue una funzione di attenzione, ovvero calcolare un insieme di pesi che determinano l'importanza relativa di ogni token nella sequenza di input rispetto agli altri token, permettendo così al modello di concentrarsi su diverse parti della sequenza di input simultaneamente.

La tabella 3.6 riassume i parametri principali dei modelli BERT<sub>BASE</sub> e BERT<sub>LARGE</sub>, mentre un'immagine rappresentativa dell'architettura dei Transformer, di BERT<sub>BASE</sub> e BERT<sub>LARGE</sub> mostrata in Figura 3.6.

Modello	Layers $L$	Hidden Size $H$	Self-Attention Heads $A$
BERT <sub>BASE</sub>	12	768	12
BERT <sub>LARGE</sub>	24	1024	16

Tabella 3.6: Parametri principali dei modelli BERT<sub>BASE</sub> e BERT<sub>LARGE</sub>

BERT è stato preaddestrato con un embedding WordPiece [49] con un vocabolario di 30.000 token. Il primo token di ogni sequenza è sempre un token di classificazione speciale ([CLS]). L'hidden state finale corrispondente a questo token è utilizzato come rappresentazione aggregata della sequenza per i task di classificazione, che è proprio il modo in cui BERT verrà utilizzato in questo lavoro. BERT può gestire più sequenze di token in input, ciascuna delle quali seguita da un token speciale ([SEP]), che permette di disambiguare l'appartenenza di un token ad una sequenza piuttosto che ad un'altra.

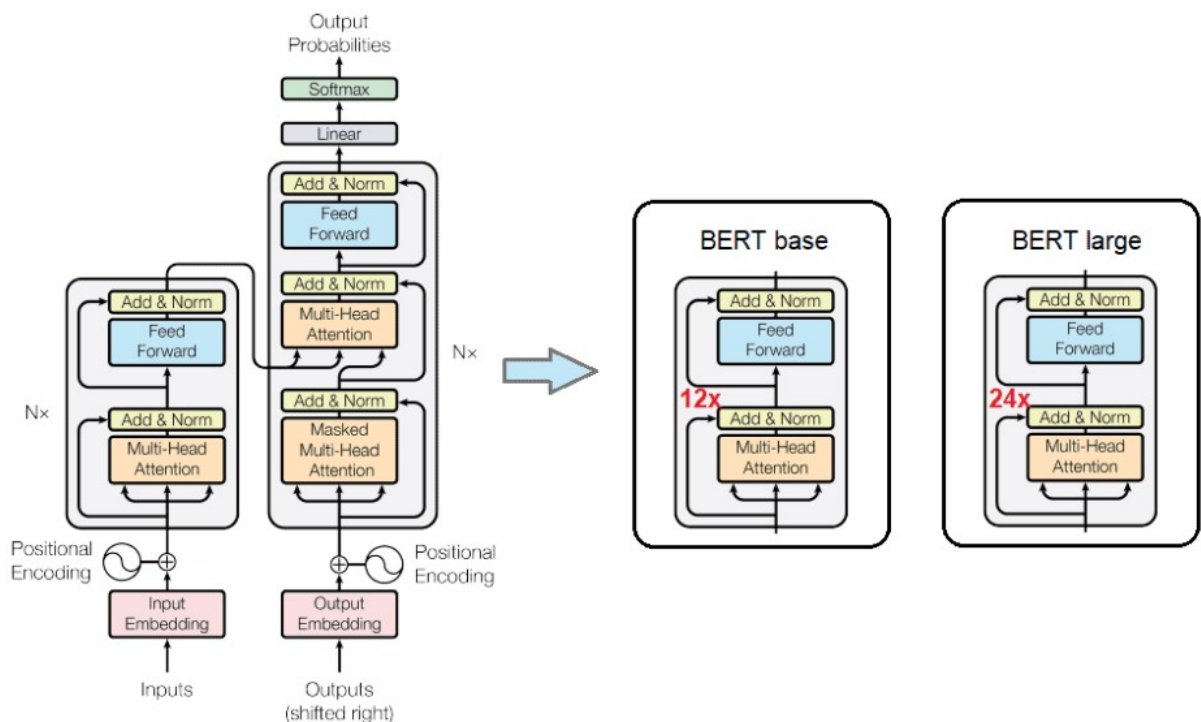


Figura 3.6: Architettura di Transformers, BERT<sub>BASE</sub> e BERT<sub>LARGE</sub>

Per ogni token in input, BERT calcola un embedding che è dato dalla somma di tre componenti come è possibile vedere in Figura 3.7:

- **Token Embeddings:** sono i vettori di embedding per ciascun token nel vocabolario. Questi embedding sono allenati durante il pre-addestramento e sono aggiornati durante il fine-tuning. BERT utilizza una tecnica chiamata Wordpiece tokenization, in cui le parole vengono suddivise in sottostringhe più piccole chiamate wordpieces. Questa tecnica permette di creare un vocabolario flessibile contenente sia parole che sotto-parole, per esempio prefissi, suffissi o singoli caratteri. Il vocabolario così creato è in grado di gestire tutte le possibili sequenze di caratteri e di evitare l'utilizzo di token OOV (Out Of Vocabulary) [49].
- **Segment Embeddings:** sono i vettori di embedding che indicano a quale sequenza appartiene ciascun token. Questi embedding sono utilizzati per distinguere tra le due sequenze di input in un task di classificazione di sequenza.
- **Position Embeddings:** sono una componente critica per aiutare il modello a comprendere la posizione di ciascun token all'interno di una sequenza di testo. Questi embedding consentono a BERT di distinguere tra parole con lo stesso contenuto ma posizionate in posizioni diverse all'interno della frase. Ci contribuisce a catturare le



relazioni tra le parole in modo più completo e consente a BERT di eccellere in una vasta gamma di compiti di elaborazione del linguaggio naturale.

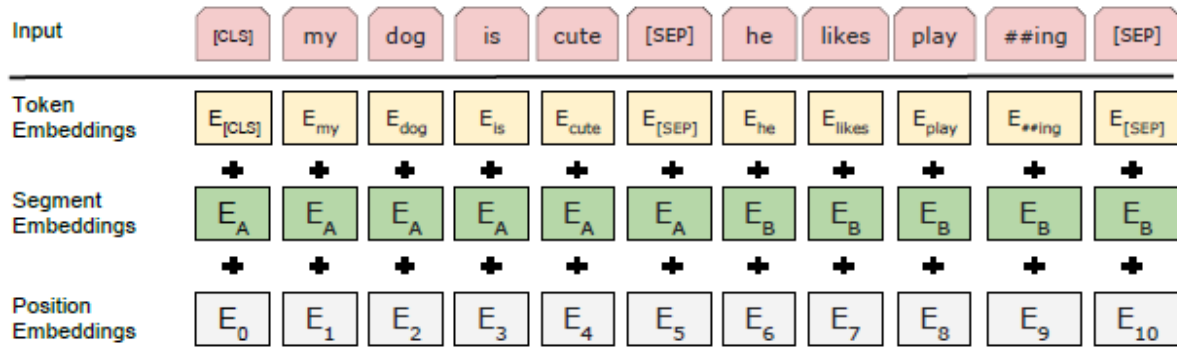


Figura 3.7: Rappresentazione degli input di BERT

## Pre-Training

Il pre-training di BERT è stato effettuato usando due task di apprendimento non supervisionato:

- **Masked Language Model (MLM)**: in questo task venivano mascherate il 15% dei token in input e si voleva far sì che il modello predicesse i token mascherati. Questo processo in letteratura viene anche spesso chiamato *Cloze* [?]. In questo caso i vettori dell'hidden layer finale che si riferisce al token mascherato venivano dati in input ad una funzione softmax sul vocabolario per predire il token mascherato. Per non creare troppo divario tra il pre-addestramento e il fine-tuning, durante questa fase di pre-training con MLM il token speciale [MASK] veniva utilizzato solo l'80% delle volte, il 10% delle volte veniva sostituito con un token casuale e il 10% delle volte veniva lasciato il token originario.
- **Next Sentence Prediction (NSP)**: in molti task di NLP, come Question-Answering, è necessario che i modelli siano in grado di comprendere relazioni tra due frasi. Per far sì che il modello imparasse a riconoscere le relazioni tra frasi BERT è stato pre-addestrato su un task di predizione della frase successiva. Nello specifico, prese due frasi A e B il modello doveva predire se la frase B fosse la successiva rispetto alla frase A, questo nel dataset di training era vero nel 50% dei casi.

## Fine-tuning di BERT

Il fine-tuning di BERT consiste nell'adattare il modello pre-allenato a compiti specifici, come la classificazione del testo, l'analisi del sentimento, il *question answering* e altri.

BERT utilizza l'architettura *Transformer*, che permette di modellare relazioni complesse tra le parole di un testo grazie al meccanismo di *self-attention*. Questo consente a BERT di processare sia singoli testi che coppie di testi.

Durante il fine-tuning, il modello pre-allenato viene ulteriormente addestrato su un dataset specifico del compito da risolvere, modificando tutti i parametri del modello. Questo include i pesi dei livelli di *self-attention*, le rappresentazioni degli *hidden layers* e i parametri degli strati di output. Ad esempio, per un compito di classificazione del testo, il token [CLS], che rappresenta l'intera sequenza, viene utilizzato per determinare la classe del testo. Per compiti a livello di token, come il *named entity recognition* (NER), ogni token del testo viene etichettato individualmente.

Il processo di fine-tuning richiede meno risorse computazionali rispetto al pre-allenamento. Con l'uso di GPU o TPU, il fine-tuning pu essere completato in poche ore, rendendo BERT un'opzione potente e versatile per una variet di applicazioni di elaborazione del linguaggio naturale.

### 3.2.3 DistilBERT

Nel 2020 stato presentato DistilBERT, un modello pi piccolo e pi veloce rispetto a BERT, sviluppato da Sanh et al. [?]. Il modello presentato dichiara che DistilBERT in grado di ridurre la complessit di BERT del 40% pur mantenendo il 97% delle prestazioni di BERT ed essere 60% pi veloce.

I risultati di DistilBERT sono stati ottenuti grazie ad una tecnica chiamata *knowledge distillation*, che una tecnica di compressione in cui modello pi piccolo, detto *modello studente*, allenato per riprodurre i comportamenti di un modello pi grande (o un insieme di modelli) detto *modello insegnante*. Questo processo di distillazione permette di ridurre la complessit del modello studente, riducendo il numero di parametri e la complessit computazionale, mantenendo allo stesso tempo le prestazioni del modello pi grande. Nell'apprendimento supervisionato, un modello di classificazione generalmente allenato per predire l'istanza di una classi massimizzando la stima di probabilit di quella label. Un modello che funziona in maniera ottima predirr una probabilit alta sulla classe corretta e probabilit vicine allo zero per le classi errate.

Il training del modello student si basa su una combinazione di tecniche di distillazione del modello e di apprendimento supervisionato. Viene calcolata una *distillation loss* utilizzando le *soft target probabilities* del modello insegnante. Questa perdita definita come:

$$L_{ce} = \sum_i t_i \log(s_i)$$

dove  $t_i$  (rispettivamente  $s_i$ ) una probabilit stimata dall'insegnante (rispettivamente dallo studente). Questa funzione obiettivo fornisce un segnale di training ricco sfrut-

tando l'intera distribuzione dell'insegnante. Seguendo [?], viene utilizzata una *softmax-temperature*, definita come:

$$p_i = \frac{\exp(z_i/T)}{\sum_j \exp(z_j/T)}$$

dove  $T$  controlla la morbidezza della distribuzione di output e  $z_i$  il punteggio del modello per la classe  $i$ . La stessa temperatura  $T$  viene applicata sia allo studente che all'insegnante durante il training, mentre in fase di inferenza,  $T$  è impostata a 1 per tornare ad una funzione *softmax* standard.

L'obiettivo finale del training è una combinazione lineare della distillation loss  $L_{ce}$  con la loss di training supervisionato, cioè la loss del *masked language modeling*  $L_{mlm}$ . Per allineare le direzioni dei vettori hidden state del modello student e teacher è stata aggiunta una *cosine embedding loss*,  $L_{cos}$ . La Loss finale è quindi definita come:

$$L = \alpha L_{ce} + \beta L_{mlm} + \gamma L_{cos}$$

Dove  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$  sono pesi che bilanciano i diversi termini di loss. Questa combinazione permette di mantenere la qualità del modello distillato avvicinandolo il più possibile alla performance del modello insegnante.

## Architettura

L'architettura del DistilBERT è simile a quella di BERT, ma con alcune differenze chiave. Vengono eliminati i *token-type embedding* e la dimensione in termini di layer viene dimezzata. Sono state ottimizzate la maggior parte delle operazioni usate nell'architettura dei Transformer, come i *linear layer* e *layer normalization* ed è stato dimostrato che ridurre la dimensione dell'hidden state non ha un impatto significativo sulle prestazioni del modello, quindi è rimasta invariata. Per l'inizializzazione del modello student è stato utilizzato un layer del modello BERT poiché hanno la stessa dimensione.

### 3.2.4 RoBERTa e CodeBERT

A partire da BERT, nel 2019 è stato presentato RoBERTa (Robustly optimized BERT approach) da Liu et al. [19]. RoBERTa è un modello di deep learning pre-addestrato per l'elaborazione del linguaggio naturale, che migliora le prestazioni di BERT attraverso una serie di modifiche e ottimizzazioni. A livello architetturale, BERT e RoBERTa sono quasi identici, entrambi basati sull'architettura *Transformer* con encoder bidirezionali. Tuttavia, le differenze principali tra i due risiedono nel processo di pre-training e nelle scelte di ottimizzazione. BERT utilizza due obiettivi di pre-training: il *Masked Language Modeling* (MLM) e il *Next Sentence Prediction* (NSP), mentre RoBERTa si concentra esclusivamente su MLM, eliminando l'obiettivo NSP. RoBERTa introduce anche il *dynamic masking*, dove le maschere applicate ai token cambiano ad ogni epoca di training,

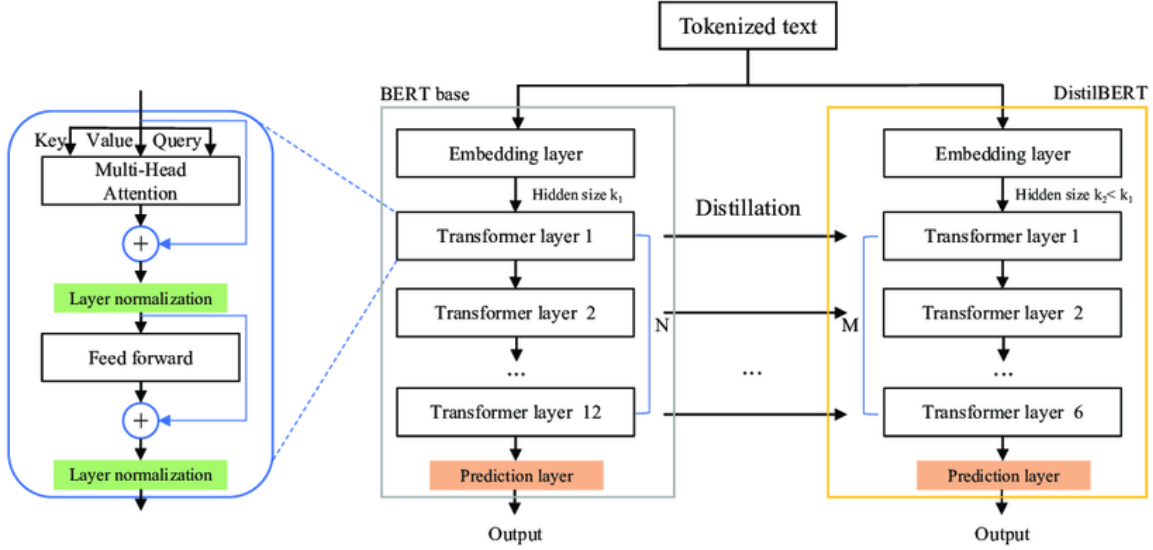


Figura 3.8: Architettura di DistilBERT

rispetto al *static masking* utilizzato da BERT. Inoltre, RoBERTa utilizza una quantità di dati di training molto più grande e adotta configurazioni di iperparametri più aggressive, come dimensioni del batch maggiori e tassi di apprendimento più elevati. Queste modifiche rendono RoBERTa più efficace e robusto, migliorando le sue performance su una varietà di compiti di elaborazione del linguaggio naturale rispetto a BERT.

Il modello CodeBERT è un modello presentato per la prima volta da Microsoft nel 2020 [11]. Il modello è stato costruito con la stessa architettura del modello RoBERTa-base, avendo quindi un numero totale di parametri pari a 125M.

### Fase di Pre-Training di CodeBERT

Nella fase di pre-training, l'input è costituito dalla concatenazione di due segmenti con un token separatore speciale, ovvero:

$$[CLS], w_1, w_2, \dots, w_n, [SEP], c_1, c_2, \dots, c_m, [EOS]$$

. Un segmento è testo in linguaggio naturale e l'altro è codice di un determinato linguaggio di programmazione.  $[CLS]$  è un token speciale posizionato all'inizio dei due segmenti, la cui rappresentazione nascosta finale viene considerata come la rappresentazione aggregata della sequenza per task di classificazione o ranking. Seguendo il metodo standard di elaborazione del testo nei *Transformer*, è stato considerato un testo in linguaggio naturale come una sequenza di parole, splittandolo utilizzando in *WordPiece*. Allo stesso modo, il codice sorgente è stato considerato come una sequenza di token. L'output di CodeBERT offre:

- la rappresentazione vettoriale contestuale di ciascun token, sia per il linguaggio naturale che per il codice
- la rappresentazione di [CLS], che funziona come rappresentazione aggregata della sequenza, allo stesso modo che in BERT.

I dati di training che sono stati utilizzati nel pretraining sono sia dati *bimodali*, ovvero dati che contengono sia testo scritto in linguaggio naturale che codice di un linguaggio di programmazione, che dati *unimodali*, ovvero dati che contengono solo codice senza linguaggio naturale.

I dati sono stati raccolti da repository Github, dove un datapoint:

- *bimodale*: rappresentato da una singola funzione a cui è associata della documentazione in linguaggio naturale.
- *unimodale*: rappresentato da una singola funzione senza documentazione in linguaggio naturale.

Nello specifico, è stato utilizzato un dataset offerto da [15] che contiene 2.1M di dati bimodali e 6.4M di dati unimodali suddivisi in 6 linguaggi di programmazione: Python, Java, JavaScript, Ruby, Go e PHP. Tutti i dati erano provenienti da repository pubblici e open-source su Github e sono stati filtrati sulla base cinque criteri:

1. ogni progetto deve essere usato da almeno un altro progetto
2. ogni documentazione viene troncata al primo paragrafo
3. le documentazioni inferiori a tre token sono state rimosse
4. funzioni più corte di tre linee di codice sono state rimosse
5. le funzioni che abbiamo nel nome la sottostringa "test" sono state rimosse

Il pretraining è stato effettuato utilizzando due diverse funzioni obiettivo. Il primo metodo è stato il MLM, che è stato utilizzato per preaddestrare il modello a predire i token mascherati, questo è stato applicato sui dati bimodali. Anche in questo caso, seguendo l'approccio usato dal modello BERT originario [8], sono stati mascherati il 15% dei token tra token appartenenti al linguaggio naturale e token facenti parte del codice sorgente. Il secondo metodo applicato è stato il *replaced token detection* che utilizza sia i dati bimodali che quelli unimodali. Durante il pre-training, alcuni token nell'input originale, che può essere testo in linguaggio naturale o codice, vengono sostituiti con token casuali. Il compito del modello è quindi rilevare quali token sono stati sostituiti. Il processo funziona nel seguente modo: il modello riceve una sequenza di token contenente sia token originali che token sostituiti. Per ogni token, il modello deve prevedere una

probabilità che indichi se il token è stato sostituito o meno. L'obiettivo di training per RTD è minimizzare la perdita di classificazione binaria tra i token originali e quelli sostituiti. Questo metodo sfrutta l'intero contesto della sequenza, permettendo a CodeBERT di apprendere rappresentazioni più ricche e accurate sia per il linguaggio naturale che per il codice.

Per quanto riguarda il fine-tuning, allo stesso modo di BERT, CodeBERT può essere specializzato su task specifici sintonizzando tutti i suoi parametri in modo molto efficiente. Il modello ha ottenuto performance allo stato dell'arte per task che includono ricerca di codice tramite linguaggio naturale, generazione di documentazione a partire dal codice.

### 3.3 Implementazione

In questa sezione, descriveremo a livello pratico quali sono state le scelte implementative effettuate per la costruzione dei modelli di classificazione degli smart contracts, descrivendo sia il pre-processing dei dati che la costruzione e l'addestramento dei modelli, nonché le librerie utilizzate.

I tre modelli precedenti, BERT, DistilBERT e CodeBERT sono quelli scelti ed utilizzati in questo lavoro per la classificazione di vulnerabilità degli smart contracts. I task di classificazione possono dividersi in tre categorie principali:

- **Classificazione Binaria:** in cui il modello deve predire se un dato elemento appartiene o meno ad una classe specifica. Facendo un esempio nel contesto degli smart contracts, un task di classificazione binaria comporterebbe la predizione della presenza o meno di vulnerabilità in uno smart contract.
- **Classificazione Multiclasse:** in cui il modello deve predire, all'interno di un insieme di classi, a quale classe appartiene un dato elemento, posto che possa appartenere ad una sola classe. Ad esempio, un task di classificazione multiclasse potrebbe essere quello di prevedere la vulnerabilità presente in uno smart contract posto che questo possa avere un solo tipo di vulnerabilità.
- **Classificazione Multilabel:** in cui il modello deve predire, all'interno di un insieme di classi, a quali classi appartiene un dato elemento, posto che possa appartenere a più classi contemporaneamente.

Questo lavoro è stato affrontato come un task di classificazione multilabel, in quanto uno smart contract può avere più di una vulnerabilità contemporaneamente.

Il codice per il pre-processing dei dati, la costruzione, il training e la valutazione dei modelli è stato scritto in Python. Python è un linguaggio di programmazione Turing-completo ad alto livello, ampiamente riconosciuto per la sua semplicità e leggibilità. La vasta disponibilità di librerie e strumenti specifici per l'elaborazione del linguaggio naturale e l'apprendimento automatico, come NumPy, Pandas e Scikit-learn, rende Python

una scelta ideale per questo tipo di ricerca. Inoltre, Python è supportato da una vasta comunità di sviluppatori e ricercatori, che lo rendono uno dei linguaggi più utilizzati a livello mondiale per la manipolazione di dati e per lo sviluppo di modelli di Machine e Deep Learning. In aiuto a Python è stata utilizzata la libreria PyTorch, una libreria di deep learning altamente performante e flessibile, sviluppata da Facebook AI Research (FAIR) [28]. PyTorch offre un'interfaccia intuitiva e dinamica per la costruzione e l'addestramento di modelli di apprendimento profondo, facilitando la sperimentazione e l'ottimizzazione dei modelli. Inoltre, PyTorch è supportato da una comunità di ricerca attiva e in crescita, che contribuisce con numerosi modelli pre-addestrati e risorse che accelerano lo sviluppo e la valutazione dei modelli. Queste caratteristiche rendono Python e PyTorch l'ovvia scelta per questo lavoro.

Fondamentali per lo sviluppo sono state altre due librerie offerte da HuggingFace, rispettivamente Transformers e Datasets. Transformers è una libreria open-source che offre un'implementazione di modelli di apprendimento profondo pre-addestrati, tra cui BERT, RoBERTa, DistilBERT e molti altri. Questa libreria offre un'interfaccia semplice e intuitiva per caricare, costruire e addestrare modelli di apprendimento profondo, facilitando la sperimentazione e l'ottimizzazione dei modelli. Datasets, invece, è una libreria open-source che offre un'interfaccia semplice e intuitiva per caricare e manipolare dataset che sono stati caricati sulla piattaforma HuggingFace. Questa libreria offre una vasta gamma di dataset pre-caricati, tra cui il dataset *rossini2022slitherauditedcontracts* utilizzato in questo lavoro, semplificando il processo di raccolta dei dati.

Di seguito, verranno presentate le tecniche utilizzate per il preprocessing dei dati e tutti gli esperimenti effettuati e i vari modelli costruiti, i cui risultati verranno poi discussi nel capitolo 4 successivo.

### 3.3.1 Pre-Processing dei Dati

Come detto in precedenza, nella sezione dell'analisi esplorativa dei dati (vedi sezione 3.1), il dataset utilizzato per questo lavoro è stato fornito da Rossini et al. [32]. Il dataset è stato ottenuto dalla piattaforma Huggingface, le quali librerie sono state utilizzate per dividere il dataset in training, validation e test set.

Per quanto riguarda il pre-processing del codice sorgente sono state rimosse tramite espressioni regolari le parti di codice riguardanti i commenti e riguardanti le funzioni getter monoistruzione. Mostriamo ora un esempio di codice per il pre-processing del codice sorgente:

```
def remove_comments(string):
    pattern = r"(\\".*?\"|\\'.*?\\'|(/\\.*?\\/|//[^\r\n]*$))"
    # first group captures quoted strings (double or single)
    # second group captures comments (//single-line or /* multi-line
    #                               */)
    regex = re.compile(pattern, re.MULTILINE|re.DOTALL)
```

```
def _replacer(match):
    # if the 2nd group is not None, then we have captured a real
    # comment string.
    if match.group(2) is not None:
        return ""
    else: # otherwise, we will return the 1st group
        return match.group(1)
return regex.sub(_replacer, string)
```

Dopo aver rimosso le funzioni getter monoistruzione, il codice sorgente viene passato ad un tokenizer, il cui compito è trasformare il testo in una serie di token, ossia unit fondamentali come parole, sottoparole o caratteri. Il tokenizer di BERT utilizza la tecnica WordPiece per segmentare il testo, frammentando le parole rare in sottoparole più comuni e preservando il contesto originale. Il tokenizer di CodeBERT, specializzato per il codice sorgente, riconosce le sintassi dei linguaggi di programmazione e segmenta il codice in token significativi.

Il processo di tokenizzazione include i seguenti passaggi:

- **Padding:** Quando le sequenze di token hanno lunghezze diverse, si utilizza il padding per uniformare la lunghezza delle sequenze al valore massimo prestabilito. Vengono aggiunti token speciali (di solito uno zero) alle sequenze più corte fino a raggiungere la lunghezza desiderata. Questo è essenziale per creare batch di dati di dimensioni uniformi per l'elaborazione parallela.
- **Token IDs:** Ogni token viene convertito in un ID numerico univoco in base al vocabolario del tokenizer. Questi ID sono utilizzati dal modello per eseguire l'elaborazione e l'analisi del testo. Per esempio, la parola "hello" potrebbe essere convertita nell'ID 123, mentre "world" potrebbe corrispondere all'ID 456.
- **Attention Mask:** La maschera di attenzione è un array di valori binari che indica quali token devono essere considerati dal modello durante l'addestramento o l'inferenza. I token reali ricevono un valore di 1, mentre i token di padding ricevono un valore di 0. Questo permette al modello di ignorare i token di padding durante il calcolo dell'attenzione.

Di seguito viene riportato un esempio di implementazione di una classe `CustomDataset` in Python, che utilizza un tokenizer per preparare il codice sorgente per l'input del modello:

```
class CustomDataset(Dataset):

    def __init__(self, dataframe, tokenizer, max_len):
        self.tokenizer = tokenizer
        self.data = dataframe
        self.sourceCode = dataframe["source_code"]
```



```

self.targets = dataframe["label"]
self.max_len = max_len

def __len__(self):
    return len(self.sourceCode)

def __getitem__(self, index):
    sourceCode = str(self.sourceCode[index])
    sourceCode = " ".join(sourceCode.split())

    inputs = self.tokenizer.encode_plus(
        sourceCode,
        None,
        add_special_tokens=True,
        max_length=self.max_len,
        pad_to_max_length=True,
        return_token_type_ids=True
    )
    ids = inputs['input_ids']
    mask = inputs['attention_mask']
    token_type_ids = inputs["token_type_ids"]

    return {
        'ids': torch.tensor(ids, dtype=torch.long),
        'mask': torch.tensor(mask, dtype=torch.long),
        'token_type_ids': torch.tensor(token_type_ids, dtype=torch.
                                         long),
        'targets': torch.tensor(self.targets[index], dtype=torch.
                                 float)
    }

```

Come si pu vedere dal codice, la funzione di tokenizzazione si incarica di aggiungere i token speciali [CLS] e [SEP] all’inizio e alla fine di ogni sequenza, rispettivamente, oltre che riceveva come parametri configurazioni su come produrre l’output, come la lunghezza massima della sequenza e se aggiungere il padding. Tutti i dati che vengono passati al modello vengono convertiti in tensori di PyTorch, che sono strutture dati multidimensionali che contengono i dati e le informazioni di forma necessarie per l’elaborazione dei dati e poi caricati in memoria GPU per l’elaborazione parallela.

Per quanto riguarda il preprocessing del bytecode, il processo molto simile a quello del codice sorgente. Anche in questo caso, il bytecode viene passato ad un tokenizer, che si occupa di trasformare il testo in una serie di token. La differenza sta nel preprocessing iniziale subito dalle stringhe. Innanzitutto, viene rimossa la stringa di prefisso "0x", comune nei dati esadecimali, per standardizzare il formato del bytecode. Questo avviene tramite una verifica iniziale della presenza del prefisso e la sua successiva eliminazione, se presente. Successivamente, il bytecode viene suddiviso in token di 2 caratteri ciascuno. Questa operazione segmenta il bytecode in coppie di cifre esadecimali che rappresentano

le istruzioni di bytecode.

### 3.3.2 BERT-base

Il primo modello ricostruito stato un modello BERT base. Il modello pretrainato a cui si fatto riferimento stato *bert-base-uncased*, un modello BERT base pre-addestrato su un corpus di testo in lingua inglese. Dopo essere stato caricato il modello ne viene estratto il pooling output per il primo token, il token [CLS] che come descritto nella sezione 3.2.2 utilizzato come rappresentazione aggregata della sequenza per task di classificazione. Questo output viene poi passato ad un layer di classificazione lineare, che prende in input un vettore di dimensione pari all'hidden state di BERT, quindi 768, e restituisce un vettore di output con dimensione pari al numero di classi (nel nostro caso 5). Questo vettore di output viene poi passato ad una funzione di attivazione softmax, che restituisce una distribuzione di probabilit su tutte le classi. Questo modello viene utilizzato per la classificazione sia del codice sorgente che del bytecode dei contratti. Mostriamo ora un esempio di codice per la costruzione del modello:

```
class BERTClassifier(torch.nn.Module):
    def __init__(self):
        super(BERTClassifier, self).__init__()
        self.bert_model = transformers.BertModel.from_pretrained('bert-
                                                                    base-uncased')

        self.dropout = torch.nn.Dropout(0.3)
        self.linear = torch.nn.Linear(768, NUM_CLASSES)

    def forward(self, input_ids, attention_mask, token_type_ids):
        _, pooled_output = self.bert_model(input_ids, attention_mask=
                                            attention_mask,
                                            token_type_ids=
                                            token_type_ids, return_dict
                                            =False)

        dropout_output = self.dropout(pooled_output)
        linear_output = self.linear(dropout_output)
        return linear_output
```

Il *pooled\_output* la rappresentazione vettoriale estratta dal modello BERT che rappresenta un'aggregazione delle informazioni apprese dal testo di input. Questa rappresentazione viene ottenuta tramite un processo di "pooling" delle rappresentazioni dei token di input prodotte dal modello BERT. Il layer di Dropout stato aggiunto per evitare l'overfitting del modello. Il modello stato addestrato utilizzando l'ottimizzatore Adam con un learning rate di  $1 \times 10^{-5}$  e una dimensione del batch di 8.

## Loss Function

La funzione di loss scelta è la `BCEWithLogitsLoss`, una funzione di perdita disponibile nella libreria PyTorch, particolarmente utile per problemi di classificazione multilabel. In questi problemi, ogni esempio può appartenere a più di una classe simultaneamente, richiedendo una previsione indipendente per ciascuna etichetta. `BCEWithLogitsLoss` combina una `Sigmoid` layer e la funzione di perdita `Binary Cross-Entropy` (BCE) in un'unica classe, rendendo il calcolo più numericamente stabile ed efficiente. La `Sigmoid` layer viene applicata all'output grezzo (logits) del modello per mappare i valori in un intervallo tra 0 e 1, rappresentando così le probabilità predette per ogni etichetta. Successivamente, la funzione di perdita BCE calcola la differenza tra le probabilità predette e le etichette target reali per ciascuna etichetta, trattando ogni etichetta come un problema di classificazione binaria indipendente. Utilizzando `BCEWithLogitsLoss`, si garantisce una gestione numerica più stabile, evitando problemi di underflow o overflow che possono sorgere quando si combinano separatamente la `Sigmoid` layer e la BCE loss, assicurando risultati più accurati e affidabili nel processo di addestramento del modello per la classificazione multilabel.

$$\text{BCEWithLogitsLoss}(y, \hat{y}) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \cdot \log(\sigma(\hat{y}_i)) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \sigma(\hat{y}_i))]$$

Dove:

- $N$  il numero di etichette.
- $y_i$  il valore target per l'etichetta  $i$ -esima.
- $\hat{y}_i$  il logit predetto per l'etichetta  $i$ -esima.
- $\sigma(\hat{y}_i)$  la funzione sigmoide applicata al logit  $\hat{y}_i$ , definita come  $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ .

### 3.3.3 DistilBERT

La costruzione di un modello DistilBERT avviene in modo pressoché identico a quello del modello BERT. Anche in questo caso si è utilizzato il modello pre-addestrato *distilbert-base-uncased*, proveniente dalla libreria Transformers. Mostriamo ora il codice per la costruzione del modello:

```
class DistilBERTClass(torch.nn.Module):
    def __init__(self, NUM_CLASSES):
        super(DistilBERTClass, self).__init__()
        self.num_classes = NUM_CLASSES
        self.distilbert = DistilBertModel.from_pretrained('distilbert-
                                                         base-uncased')
```

```

self.dropout = torch.nn.Dropout(0.3)
self.fc = torch.nn.Linear(768, NUM_CLASSES)

def forward(self, input_ids, attention_mask):
    outputs = self.distilbert(input_ids=input_ids, attention_mask=
                             attention_mask)

    pooled_output = outputs.last_hidden_state[:, 0]
    pooled_output = self.dropout(pooled_output)
    output = self.fc(pooled_output)
    return output

```

Anche in questo caso, il modello è stato addestrato utilizzando l'ottimizzatore Adam con un learning rate di  $1 \times 10^{-5}$  e una dimensione del batch di 8 e la funzione di loss BCEWithLogitsLoss. Come per il modello BERT, il layer di Dropout è stato aggiunto per evitare l'overfitting del modello.

Come si può notare dal codice sopra riportato, a differenza del modello BERT, il modello DistilBERT non prende in input i token type ids, in quanto non sono presenti nella struttura del modello DistilBERT.

### 3.3.4 CodeBERT

Anche il modello CodeBERT è stato costruito in modo simile ai modelli BERT e DistilBERT. Il modello pre-addestrato utilizzato è stato *microsoft/codebert-base*, proveniente dalla libreria Transformers. Mostriamo ora il codice per la costruzione del modello:

```

class CodeBERTClass(torch.nn.Module):
    def __init__(self, NUM_CLASSES):
        super(CodeBERTClass, self).__init__()
        self.num_classes = NUM_CLASSES
        self.codebert = AutoModel.from_pretrained('microsoft/
                                                  codebert-base')

        self.dropout = torch.nn.Dropout(0.3)
        self.fc = torch.nn.Linear(768, NUM_CLASSES)

    def forward(self, ids, mask):
        outputs = self.codebert(input_ids=ids, attention_mask=mask)
        pooled_output = outputs.pooler_output
        pooled_output = self.dropout(pooled_output)
        output = self.fc(pooled_output)
        return output

```

Anche in questo caso, il modello è stato addestrato utilizzando l'ottimizzatore Adam con un learning rate di  $1 \times 10^{-5}$  e una dimensione del batch di 8 e la funzione di loss BCEWithLogitsLoss. Come per i modelli BERT e DistilBERT, il layer di Dropout è stato aggiunto per evitare l'overfitting del modello.

### 3.3.5 CodeBERT con aggregazione

Una delle principali limitazioni riscontrate nel training dei precedenti modelli, che i modelli della famiglia BERT hanno una capacità massima in input di 512 token. I nostri smart contract, come visto nella sezione 3.1 hanno una lunghezza media di circa 1500 token, dare quindi in input al modello solo 512 token significa far sì che il modello analizzi, in molti casi, solo una piccola porzione iniziale dei nostri contratti. Per ovviare a questo problema, è stato deciso di dividere i nostri contratti in sotto-contratti di lunghezza massima 512 token e poi aggregare gli embedding prodotti da CodeBERT per ogni sotto-contratto tramite delle funzioni di aggregazione come media e massimo. Questo approccio permette di far sì che il modello possa analizzare l'intero contratto, anche se in sotto-parti. Mostriamo ora il codice per la costruzione del modello:

```
class CodeBERTAggregatedClass(torch.nn.Module):
    def __init__(self, num_classes, aggregation='mean', dropout=0.3):
        super(CodeBERTAggregatedClass, self).__init__()
        self.codebert = AutoModel.from_pretrained('microsoft/
                                                    codebert-base',
                                                    cache_dir='./cache')
        self.dropout = torch.nn.Dropout(dropout)
        self.fc = torch.nn.Linear(self.codebert.config.hidden_size,
                                    num_classes)
        self.aggregation = aggregation

    def forward(self, input_ids, attention_masks):
        batch_size, seq_len = input_ids.size()

        # Divide input_ids e attention_masks in blocchi di 512
        # token
        num_chunks = (seq_len + 511) // 512
        input_ids = input_ids[:, :512*num_chunks].view(batch_size *
                                                         num_chunks, 512)
        attention_masks = attention_masks[:, :512*num_chunks].view(
            batch_size * num_chunks,
            512)

        outputs = self.codebert(input_ids=input_ids, attention_mask
                                =attention_masks)

        last_hidden_states = outputs.last_hidden_state
        cls_tokens = last_hidden_states[:, 0, :]

        cls_tokens = cls_tokens.view(batch_size, num_chunks, -1)

        if self.aggregation == 'mean':
            aggregated_output = torch.mean(cls_tokens, dim=1)
        elif self.aggregation == 'max':
```

```

        aggregated_output, _ = torch.max(cls_tokens, dim=1)
    else:
        raise ValueError("Aggregation must be 'mean' or 'max'")

    aggregated_output = self.dropout(aggregated_output)
    output = self.fc(aggregated_output)
    return output

```

Questo approccio è stato testato sia con la funzione di aggregazione *mean* che con la funzione di aggregazione *max*, che restituiscono rispettivamente la media e il massimo degli embedding prodotti da CodeBERT per ogni sotto-contratto. Inoltre, sono stati testati approcci per entrambi in cui venivano utilizzati due o tre blocchi di codice, quindi si classificavano rispettivamente 1024 e 1536 token.

### 3.3.6 CodeBert con concatenazione

Un altro approccio complementare alla risoluzione del problema legato al massimo numero di token che i modelli della famiglia BERT possono accettare come input è stato quello di concatenare gli embedding prodotti da CodeBERT per ogni sotto-contratto. Questo approccio permette di mantenere l'informazione relativa a tutti i token del contratto e di fornire al modello un'informazione più completa. Mostriamo ora il codice per la costruzione del modello:

```

class CodeBERTConcatenatedClass(torch.nn.Module):
    def __init__(self, num_classes, dropout=0.3):
        super(CodeBERTConcatenatedClass, self).__init__()
        self.codebert = AutoModel.from_pretrained('microsoft/codebert-base', cache_dir="./cache")

        self.dropout = torch.nn.Dropout(dropout)
        # Multiply hidden_size by the number of chunks you're
        # concatenating
        self.fc = torch.nn.Linear(self.codebert.config.hidden_size *
                                   CODE_BLOCKS, num_classes)

    def forward(self, input_ids, attention_masks):
        batch_size, seq_len = input_ids.size()

        # Divide input_ids and attention_masks into chunks of 512
        # tokens
        num_chunks = (seq_len + 511) // 512
        input_ids = input_ids[:, :512*num_chunks].reshape(batch_size *
                                                            num_chunks, 512)
        attention_masks = attention_masks[:, :512*num_chunks].reshape(
            batch_size * num_chunks,
            512)

```

```

outputs = self.codebert(input_ids=input_ids, attention_mask=
                        attention_masks)

last_hidden_states = outputs.last_hidden_state
cls_tokens = last_hidden_states[:, 0, :]

# Concatenate the CLS tokens of the various chunks
cls_tokens = cls_tokens.reshape(batch_size, num_chunks, -1)
concatenated_output = cls_tokens.reshape(batch_size, -1)

concatenated_output = self.dropout(concatenated_output)
output = self.fc(concatenated_output)
return output

```

In questo caso, si divide la stringa in input in chunk da 512 token e si ottengono gli embedding prodotti da codeBERT per ognuno di questi chunk. Questi embedding vengono poi concatenati e passati ad un layer di classificazione lineare. Anche in questo caso l'approccio è stato testato sia con due che con tre blocchi di codice, quindi si classificavano rispettivamente 1024 e 1536 token.

### 3.3.7 Train e Validation

Tutti i modelli sono stati addestrati (o fine-tunati) per 20 epoche, con un learning rate di  $1 \times 10^{-5}$ . Per evitare l'overfitting, è stato utilizzato un layer di Dropout con un rate del 30%. La funzione di loss utilizzata è stata la BCEWithLogitsLoss, che è stata utilizzata per la classificazione multilabel. L'ottimizzatore utilizzato è stato Adam. I modelli sono stati addestrati su una GPU NVIDIA 2080Ti. A seguito di limitazioni dovute alla potenza di calcolo e alla grandezza del dataset in alcuni casi è stato necessario ridurre la batch size. Nello specifico, per i modelli di aggregazione e concatenazione che utilizzavano due blocchi di codice (1024 token) la batch size è stata ridotta a 4, mentre per i modelli che utilizzavano tre blocchi di codice (1536 token) la batch size è stata ridotta a 2. Questa potrebbe essere sicuramente una limitazione al lavoro, in quanto una batch size ridotta potrebbe portare ad un addestramento più lento e a risultati meno accurati. Si rimanda a futura ricerca la possibilità di addestrare i modelli con potenze di calcolo maggiori per effettuare dei tuning dei parametri più accurati.

## 3.4 Stacking

Seguendo l'approccio proposto da [7] è stato effettuato un esperimento di stacking per combinare il miglior modello costruito sul codice sorgente e il miglior modello costruito sul bytecode.

Per multimodalità si intende la descrizione dello stesso oggetto da punti di vista differenti. I nostri smart contracts, nel nostro dataset, ad esempio, vengono rappresentati sia

dal codice sorgente che dal bytecode. Questi due punti di vista sono due punti di vista diversi ma che rappresentano la stessa cosa in modo diverso. L'idea alla base quella che modalit diverse della stessa rappresentazione possano fornire informazioni complementari che possono essere utilizzate per migliorare le prestazioni del modello. Esistono tre modi per combinare le informazioni provenienti da diverse modalit, visibili in figura 3.9:

- **Fusione Basata su Caratteristiche:** le caratteristiche estratte da diverse modalit vengono combinate direttamente e l'unione delle stesse viene utilizzata per l'addestramento del modello. Questa tecnica permette di combinare le informazioni estratte da diverse modalit in un'unica rappresentazione, ma pu rendere il training molto pi complesso poich spesso si lavora con feature altamente dimensionali e dati eterogenei.
- **Fusione Basata su Decisioni:** si addestrano modelli separati per ciascuna modalit e si combinano le decisioni ottenute da ciascun modello per allenare un meta-classificatore che fornisce il risultato finale. Questa tecnica ha il grande vantaggio di riuscire a unire dati eterogenei ma pu soffrire di una perdita di informazioni.
- **Fusione Ibrida:** combina le caratteristiche della fusione basata su caratteristiche e la fusione basata su decisioni. Questa tecnica combina i vantaggi delle due tecniche di fusione precedenti, ma rende il modello e l'apprendimento pi complesso.

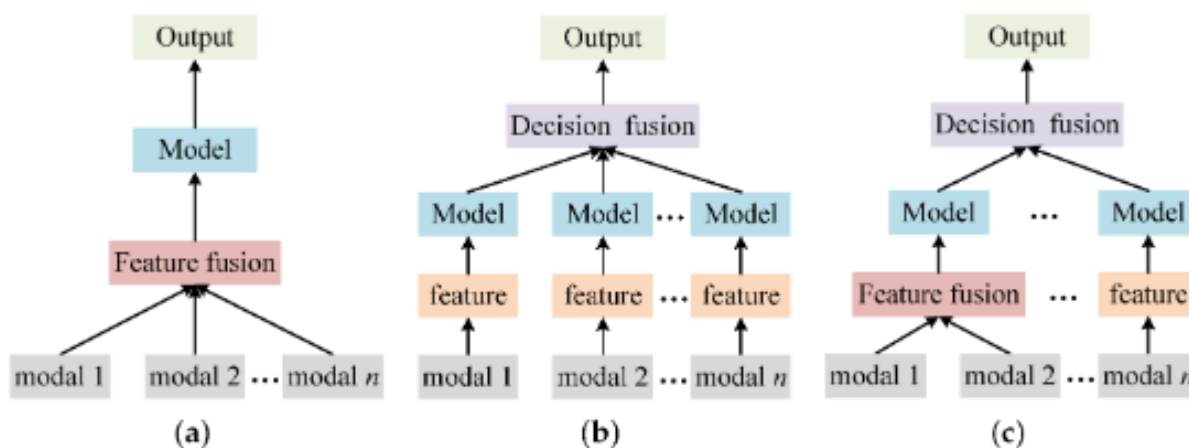


Figura 3.9: Confronto tra i tre metodi di fusione. (a) Fusione basata su caratteristiche. (b) Fusione basata su decisioni. (c) Fusione Ibrida.

In questo lavoro, stato utilizzato un approccio di fusione basato su decisioni, in cui i modelli costruiti su codice sorgente e bytecode sono stati addestrati separatamente e le



decisioni di entrambi i modelli sono state combinate per addestrare un meta-classificatore che fornisce il risultato finale.

Questo approccio è stato testato con differenti modelli utilizzati come meta-classificatori, tra cui un modello di regressione logistica, un modello di support vector machine, un modello di random forest, un decision tree ed un modello Bayesiano. Tutti i modelli sono stati addestrati utilizzando la libreria Scikit-learn e l'API MultiOutputClassifier, che permette di addestrare un classificatore multilabel su più target e sono stati sintonizzati gli iperparametri specifici di ogni modello utilizzando la funzione GridSearchCV.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i modelli costruiti su codice sorgente e bytecode per valutare l'efficacia dell'approccio di stacking.

## 3.5 Gemini

Gemini è una famiglia di large language model multimodali sviluppato da Deep Mind Google, l'azienda fondata nel 2010 con sede a Londra che ha il compito di fare ricerca e sviluppo nel campo dell'intelligenza artificiale [47]. Questa famiglia di modelli, nata come successore di LaMDA e PaLM2, e comprende Gemini Ultra, Gemini Pro e Gemini Nano. Questi modelli sono stati poi resi famosi per dar vita al chatbot Gemini di Google, che si pone come principale competitor di GPT-4 di OpenAI [46].

La prima generazione di Gemini ("Gemini 1") ha tre modelli, con la stessa architettura software. Si tratta di transformer solo-decoder. Hanno una lunghezza del contesto di 32768 token. Sono poi state distillate due versioni di Gemini Nano: Nano-1 con 1,8 miliardi di parametri e Nano-2 avente 3,25 miliardi di parametri. Questi modelli sono distillati da modelli Gemini più grandi, progettati per l'uso da parte di dispositivi con potenza di calcolo limitata come gli smartphone. Poiché Gemini è multimodale, ogni finestra di contesto può contenere più forme di input. Le diverse modalità possono essere interlacciate e non devono essere presentate in un ordine fisso, consentendo una conversazione multimodale. Ad esempio, l'utente potrebbe aprire la conversazione con una miscela di testo, immagini, video e audio, presentata in qualsiasi ordine e Gemini potrebbe rispondere con lo stesso ordine libero.

Il dataset di Gemini è multimodale e multilingue, composto da "documenti web, libri e codice, e include dati di immagini, audio e video".

La seconda generazione di Gemini ("Gemini 1.5") ha due modelli pubblicati finora:

- *Gemini 1.5 Pro*: si tratta di un mixture-of-expertise sparso multimodale.
- *Gemini 1.5 Flash*: un modello distillato da Gemini 1.5 Pro, con una lunghezza del contesto superiore a 2 milioni.

Al giorno d'oggi, chatbot come Gemini e ChatGPT vengono sempre più spesso utilizzati come strumenti di supporto per le attività di tutti i giorni, come la ricerca di informazioni,

la creazione di contenuti e la gestione delle attività quotidiane. Lo sviluppo software non si esime da questa tendenza, e sempre più spesso si fa ricorso a chatbot per la gestione di task di programmazione e sviluppo software sempre più complessi. Data l'importanza che questi strumenti stanno assumendo nelle nostre vite, è importante valutarne le performance e la qualità. Diventa quindi importante confrontare i modelli costruiti in questo lavoro di tesi con modelli già esistenti e ampiamente utilizzati come Gemini e ChatGPT.

Per valutare quanto i modelli costruiti in questo lavoro siano performanti rispetto a chatbot disponibili online gratuitamente (o in versioni Pro a pagamento) come ChatGPT e Gemini, è stata utilizzata la versione gratuita delle API di Gemini 1.5 Flash per testarlo in un task di classificazione multilabel delle vulnerabilità degli smart contracts. Non è stato possibile effettuare gli stessi test utilizzando le API di ChatGPT in quanto esse non sono disponibili in forma di prova gratuita.

Il campione di dati raccolto per la valutazione del modello Gemini 1.5 Flash, composto da 1169 elementi a partire dal dataset di test. Questo è stato utilizzato come indicazione delle performance del modello rispetto ai modelli costruiti in questo lavoro. Non è stato possibile raccogliere un campione di dati più ampio (come ad esempio l'intero dataset di test) a causa delle limitazioni della versione gratuita delle API.

Il prompt utilizzato per la valutazione di Gemini 1.5 Flash è stato scritto in lingua inglese e recita:

Analyze the following smart contract for the presence of the following vulnerabilities:

access-control

arithmetic

other

reentrancy

unchecked-calls

Reply ONLY with an array of 5 elements where each element is either 0 or 1. A 1 indicates the presence of the corresponding vulnerability, and a 0 indicates its absence.

For example, if the contract has arithmetic and reentrancy vulnerabilities, the output should be [0,1,0,1,0].

A questo prompt veniva concatenato la stringa del codice sorgente del contratto da analizzare, opportunamente già preprocessato con le stesse tecniche utilizzate per i modelli descritti in precedenza, quindi la rimozione dei commenti e delle funzioni getter monodistruzione. Mostriamo quindi un esempio di codice per l'utilizzo delle API di Gemini 1.5 Flash:

```

import pathlib
import textwrap

import google.generativeai as genai

from IPython.display import display
from IPython.display import Markdown
from google.colab import userdata
GOOGLE_API_KEY=userdata.get('GOOGLE_API_KEY')

genai.configure(api_key=GOOGLE_API_KEY)
model = genai.GenerativeModel('gemini-1.5-flash')
response = model.generate_content(basePrompt + sourceCode)

```

Come si pu notare nel codice sopra riportato, l'utilizzo del modello Gemini 1.5 Flash estremamente semplice e intuitivo. Dopo aver configurato l'API key, si crea un oggetto di tipo `GenerativeModel` passando come parametro il nome del modello, in questo caso "gemini-1.5-flash". Successivamente, si chiama il metodo `generate_content` passando come parametro il prompt da utilizzare per la generazione del testo. Il risultato della chiamata al metodo `generate_content` un oggetto di tipo `GenerativeModelResponse` che contiene il testo generato dal modello. Il testo generato stato controllato per assicurarsi che la generazione abbia prodotto solo un array di 5 elementi, ognuno dei quali 0 o 1, come richiesto dal prompt. Questo risultato vero per tutti i 1169 elementi del campione di dati. Successivamente, stato convertito il testo generato in un array di 5 elementi, ognuno dei quali 0 o 1, per poter calcolare le metriche di valutazione.

# Capitolo 4

## Results

Questo capitolo di questo lavoro di tesi è dedicato alla presentazione dei risultati ottenuti dai vari esperimenti effettuati durante il lavoro. Nello specifico verranno presentati i risultati in fase di test dei modelli utilizzati oltre che i risultati in test ottenuti a partire dalle API del modello Gemini. Prima dei risultati, verranno introdotte le metriche scelte per valutare i modelli.

### 4.1 Metriche di Valutazione

Le metriche di valutazione sono utilizzate per misurare le prestazioni di un modello di classificazione. Esse sono calcolate confrontando le previsioni del modello con le etichette reali del dataset. Le metriche di valutazione più comuni includono Accuracy, Precision, Recall e F1 Score. Queste metriche sono calcolate a partire dalle seguenti misurazioni: True Positives (TP), True Negatives (TN), False Positives (FP) e False Negatives (FN).

- **True Positives (TP):** Il numero di istanze correttamente classificate come appartenenti a una certa classe.
- **True Negatives (TN):** Il numero di istanze correttamente classificate come non appartenenti a una certa classe.
- **False Positives (FP):** Il numero di istanze erroneamente classificate come appartenenti a una certa classe.
- **False Negatives (FN):** Il numero di istanze erroneamente classificate come non appartenenti a una certa classe.

Le metriche, calcolate a partire da queste misurazioni, utilizzate in questo lavoro di tesi sono:

## Accuracy

L'Accuracy misura la proporzione di previsioni corrette sul totale delle istanze e viene calcolata come:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Pro: Facile da interpretare e calcolare.

Contro: In un contesto multilabel con classi sbilanciate, pu essere fuorviante perch non considera la distribuzione delle classi.

## Precision

La Precision (Micro, Macro, Weighted) misura la proporzione di istanze rilevanti tra quelle recuperate. Le formulazioni sono:

- **Micro Precision:** Aggrega i contributi di tutte le classi per calcolare la precision complessiva.

$$\text{Micro Precision} = \frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FP}$$

- **Macro Precision:** Calcola la precision per ogni classe e poi ne fa la media.

$$\text{Macro Precision} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Precision}_i$$

- **Weighted Precision:** Calcola la precision per ogni classe ponderata per il numero di veri positivi.

$$\text{Weighted Precision} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Precision}_i \times w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Pro: Indica quanto rilevanti sono le previsioni fatte.

Contro: Pu essere ingannevole se il modello ha pochi falsi positivi ma molti falsi negativi.

## Recall

La Recall (Micro, Macro, Weighted) misura la proporzione di istanze rilevanti che sono state recuperate. Le formulazioni sono:

- **Micro Recall:** Aggrega i contributi di tutte le classi per calcolare la recall complessiva.

$$\text{Micro Recall} = \frac{\sum TP}{\sum TP + \sum FN}$$

- **Macro Recall:** Calcola la recall per ogni classe e poi ne fa la media.

$$\text{Macro Recall} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Recall}_i$$

- **Weighted Recall:** Calcola la recall per ogni classe ponderata per il numero di veri positivi.

$$\text{Weighted Recall} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Recall}_i \times w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Pro: Indica quanto bene il modello è in grado di identificare tutte le istanze rilevanti.

Contro: Può essere fuorviante se il modello ha molti falsi positivi.

## F1 Score

L’F1 Score (Micro, Macro, Weighted) è la media armonica di precision e recall, offrendo un bilanciamento tra le due. Le formulazioni sono:

- **Micro F1:** Combina micro precision e micro recall.

$$\text{Micro F1} = 2 \times \frac{\text{Micro Precision} \times \text{Micro Recall}}{\text{Micro Precision} + \text{Micro Recall}}$$

- **Macro F1:** Calcola l’F1 score per ogni classe e poi ne fa la media.

$$\text{Macro F1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{F1}_i$$

- **Weighted F1:** Calcola l’F1 score per ogni classe ponderata per il numero di veri positivi.

$$\text{Weighted F1} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{F1}_i \times w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Pro: Bilancia precision e recall in un’unica metrica.

Contro: Può essere difficile da interpretare in presenza di classi molto sbilanciate.

## 4.2 Risultati modelli sul Bytecode

In questa sezione verranno mostrati i risultati ottenuti dai modelli di classificazione utilizzati per la classificazione del bytecode. I modelli utilizzati sono stati allenati sul

dataset di training, validati sul dataset di validazione e testati sul dataset di test. I risultati ottenuti sono stati calcolati utilizzando le metriche di valutazione precedentemente descritte.

Per quanto riguarda il bytecode stato dapprima utilizzato un modello BERT ed un modello CodeBert per la classificazione del bytecode utilizzando 512 token in input. Successivamente, poich i risultati migliori sono stati ottenuti dal modello CodeBert, questo stato il modello scelto per gli esperimenti successivi.

## BERT

L'accuratezza del modello del 70,48%. La precision, recall e f1-score per ciascuna delle classi sono mostrate nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.87	0.67	0.76	2331
arithmetic	0.88	0.59	0.71	2708
other	0.81	0.73	0.76	4193
reentrancy	0.88	0.78	0.83	4838
unchecked-calls	0.90	0.87	0.88	7276
<b>Micro avg</b>	0.8726	0.7654	0.8155	21346
<b>Macro avg</b>	0.8694	0.7287	0.7895	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8724	0.7654	0.8126	21346
<b>Samples avg</b>	0.5200	0.5000	0.5000	21346

Tabella 4.1: Classification Report del modello BERT sul bytecode

## CodeBert

L'accuratezza del modello del 72,54%. La precision, recall e f1-score per ciascuna delle classi sono mostrate nel classification report sottostante.

<b>Class</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>F1-Score</b>	<b>Support</b>
access-control	0.87	0.72	0.79	2331
arithmetic	0.81	0.69	0.75	2708
other	0.85	0.73	0.78	4193
reentrancy	0.88	0.81	0.84	4838
unchecked-calls	0.93	0.86	0.89	7276
<b>Micro avg</b>	0.8800	0.7869	0.8309	21346
<b>Macro avg</b>	0.8661	0.7622	0.8104	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8787	0.7869	0.8298	21346
<b>Samples avg</b>	0.5400	0.5100	0.5100	21346

Tabella 4.2: Classification Report del modello CodeBert sul bytecode

## CodeBert Aggregazione di due chunk

### Aggregazione con funzione Mean

L'accuratezza del modello del 76.13%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

<b>Class</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>F1-Score</b>	<b>Support</b>
access-control	0.88	0.77	0.82	2331
arithmetic	0.82	0.76	0.79	2708
other	0.86	0.78	0.82	4193
reentrancy	0.89	0.84	0.86	4838
unchecked-calls	0.91	0.91	0.91	7276
<b>Micro avg</b>	0.8805	0.8349	0.8571	21346
<b>Macro avg</b>	0.8708	0.8121	0.8400	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8795	0.8349	0.8561	21346
<b>Samples avg</b>	0.5600	0.5500	0.5500	21346

Tabella 4.3: Classification Report per il modello Code Bert con aggregazione a due chunk usando la media

### Aggregazione con funzione Max

L'accuratezza del modello del 76.10%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.



Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.85	0.78	0.81	2331
arithmetic	0.86	0.73	0.79	2708
other	0.83	0.82	0.82	4193
reentrancy	0.87	0.86	0.86	4838
unchecked-calls	0.90	0.93	0.92	7276
<b>Micro avg</b>	0.8691	0.8513	0.8601	21346
<b>Macro avg</b>	0.8612	0.8245	0.8415	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8682	0.8513	0.8588	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5600	0.5500	21346

Tabella 4.4: Classification Report per il modello Code Bert con aggregazione a due chunk usando il massimo

### CodeBert Aggregazione di tre chunk

#### Aggregazione con funzione Mean

L'accuratezza del modello del 76.75%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.86	0.78	0.82	2331
arithmetic	0.81	0.77	0.79	2708
other	0.82	0.83	0.82	4193
reentrancy	0.88	0.86	0.87	4838
unchecked-calls	0.92	0.92	0.92	7276
<b>Micro avg</b>	0.8725	0.8530	0.8626	21346
<b>Macro avg</b>	0.8590	0.8302	0.8440	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8722	0.8530	0.8622	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5600	0.5500	21346

Tabella 4.5: Classification Report per CodeBert con aggregazione a tre chunk usando la media

#### Aggregazione con funzione Max

L'accuratezza del modello del 76.60%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.83	0.80	0.82	2331
arithmetic	0.85	0.74	0.79	2708
other	0.84	0.82	0.83	4193
reentrancy	0.89	0.84	0.86	4838
unchecked-calls	0.92	0.92	0.92	7276
<b>Micro avg</b>	0.8796	0.8462	0.8626	21346
<b>Macro avg</b>	0.8659	0.8242	0.8441	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8789	0.8462	0.8619	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5600	0.5500	21346

Tabella 4.6: Classification Report per CodeBert con aggregazione a tre chunk usando il massimo

### CodeBert Concatenazione di due chunk

L'accuratezza del modello del 76,26%. La precision, recall e f1-score per ciascuna delle classi sono mostrate nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.86	0.78	0.82	2331
arithmetic	0.82	0.76	0.79	2708
other	0.84	0.81	0.83	4193
reentrancy	0.89	0.85	0.87	4838
unchecked-calls	0.90	0.93	0.91	7276
<b>Micro avg</b>	0.8725	0.8487	0.8604	21346
<b>Macro avg</b>	0.8619	0.8250	0.8427	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8715	0.8487	0.8596	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5600	0.5500	21346

Tabella 4.7: Classification Report per CodeBERT con concatenazione di due chunk

### CodeBert Concatenazione di tre chunk

L'accuratezza del modello del 79,39%. La precision, recall e f1-score per ciascuna delle classi sono mostrate nel classification report sottostante.

#### 4.2.1 Analisi

Per i modelli allenati sul bytecode i risultati migliori sono stati ottenuti utilizzando il modello CodeBERT che supera il modello BERT in tutte le metriche di valutazione, tranne che per la recall della classe unchecked-calls. Completati gli altri esperimenti, per i quali si è deciso di utilizzare il modello CodeBERT poiché è stato quello che ha ottenuto

i risultati migliori, si è notato che il passaggio da due a tre chunk non ha portato a un miglioramento significativo delle prestazioni del modello. Il miglior modello seppur di decimi è stato quello con aggregazione di tre chunk con funzione di aggregazione Mean con un'accuratezza sul test set del 76,75% ed un F1 Micro del 86,26%.

Per quanto riguarda l'analisi delle performance per le singole classi da classificare, si può notare come il miglior modello abbia anche le migliori performance in termini di precision, recall e f1-score per reentrancy, unchecked-calls, arithmetic e other. Per quanto riguarda la classe access-control il modello con aggregazione a tre chunk con funzione di aggregazione Max ha invece ottenuto la migliore recall, dimostrando di essere il modello migliore per identificare le istanze di questa classe.

### **4.3 Risultati sul Codice Sorgente Solidity**

Questa sezione presenta i risultati ottenuti nei modelli di classificazione utilizzati che prendevano in input in codice sorgente Solidity. Anche in questo caso, i modelli utilizzati sono stati allenati sul dataset di training, validati sul dataset di validazione e testati sul dataset di test ed i risultati ottenuti sono stati calcolati utilizzando le metriche di valutazione precedentemente descritte.

Allo stesso modo del bytecode, è stato dapprima utilizzato un modello BERT ed un modello CodeBert per la classificazione del codice sorgente Solidity utilizzando 512 token in input. Successivamente, poiché i risultati migliori sono stati ottenuti dal modello CodeBert, è stato utilizzato questo modello per gli esperimenti successivi in cui si utilizzavano porzioni più ampie dei dati a disposizione.

#### **BERT**

#### **CodeBert**

#### **DistilBert**

#### **CodeBert Concatenazione di due chunk**

L'accuratezza del modello è del 76,36%. La precision, recall e f1-score per ciascuna delle classi sono mostrate nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.86	0.78	0.82	2331
arithmetic	0.81	0.81	0.81	2708
other	0.82	0.78	0.80	4193
reentrancy	0.90	0.80	0.85	4838
unchecked-calls	0.94	0.91	0.93	7276
<b>Micro avg</b>	0.8819	0.8342	0.8574	21346
<b>Macro avg</b>	0.8662	0.8172	0.8406	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8821	0.8342	0.8571	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5600	0.5500	21346

Tabella 4.8: Classification Report del modello codeBERT con concatenazione di due chunk

### CodeBert Concatenazione di tre chunk

L'accuratezza del modello del 79,39%. La precision, recall e f1-score per ciascuna delle classi sono mostrate nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.87	0.82	0.84	2331
arithmetic	0.90	0.81	0.85	2708
other	0.87	0.79	0.83	4193
reentrancy	0.91	0.84	0.87	4838
unchecked-calls	0.95	0.93	0.94	7276
<b>Micro avg</b>	0.9103	0.8561	0.8824	21346
<b>Macro avg</b>	0.8994	0.8387	0.8677	21346
<b>Weighted avg</b>	0.9093	0.8561	0.8816	21346
<b>Samples avg</b>	0.5900	0.5700	0.5700	21346

Tabella 4.9: Classification Report del modello codeBERT con concatenazione di tre chunk

### CodeBert Aggregazione di due chunk

#### Aggregazione con funzione Max

L'accuratezza del modello del 76.50%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

<b>Class</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>F1-Score</b>	<b>Support</b>
access-control	0.87	0.77	0.82	2331
arithmetic	0.83	0.80	0.82	2708
other	0.80	0.80	0.80	4193
reentrancy	0.90	0.81	0.85	4838
unchecked-calls	0.94	0.91	0.93	7276
<b>Micro avg</b>	0.8816	0.8369	0.8586	21346
<b>Macro avg</b>	0.8687	0.8181	0.8422	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8821	0.8369	0.8585	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5600	0.5600	21346

Tabella 4.10: Classification Report del modello codeBERT con aggregazione di due chunk

#### Aggregazione con funzione Mean

L'accuratezza del modello del 75.84%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

<b>Class</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>F1-Score</b>	<b>Support</b>
access-control	0.84	0.77	0.81	2331
arithmetic	0.82	0.80	0.81	2708
other	0.81	0.77	0.79	4193
reentrancy	0.90	0.80	0.85	4838
unchecked-calls	0.94	0.90	0.92	7276
<b>Micro avg</b>	0.8830	0.8233	0.8521	21346
<b>Macro avg</b>	0.8657	0.8068	0.8350	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8833	0.8233	0.8520	21346
<b>Samples avg</b>	0.5700	0.5500	0.5500	21346

Tabella 4.11: Classification Report del modello con aggregazione di due chunk

### CodeBert Aggregazione di tre chunk

#### Aggregazione con funzione Max

L'accuratezza del modello del 79.08%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.87	0.83	0.85	2331
arithmetic	0.86	0.84	0.85	2708
other	0.84	0.82	0.83	4193
reentrancy	0.91	0.84	0.87	4838
unchecked-calls	0.95	0.94	0.94	7276
<b>Micro avg</b>	0.8983	0.8671	0.8824	21346
<b>Macro avg</b>	0.8855	0.8524	0.8685	21346
<b>Weighted avg</b>	0.8983	0.8671	0.8822	21346
<b>Samples avg</b>	0.5900	0.5800	0.5700	21346

Tabella 4.12: Classification Report del modello con aggregazione di tre chunk e funzione Max

#### Aggregazione con funzione Mean

L'accuratezza del modello è del 78.97%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.89	0.82	0.85	2331
arithmetic	0.89	0.81	0.85	2708
other	0.83	0.83	0.83	4193
reentrancy	0.92	0.82	0.86	4838
unchecked-calls	0.95	0.93	0.94	7276
<b>Micro avg</b>	0.9047	0.8566	0.8800	21346
<b>Macro avg</b>	0.8959	0.8411	0.8672	21346
<b>Weighted avg</b>	0.9051	0.8566	0.8797	21346
<b>Samples avg</b>	0.5900	0.5700	0.5700	21346

Tabella 4.13: Classification Report del modello codeBERT con aggregazione mean di tre chunk

### 4.3.1 Analisi

Anche in questo caso, nei primi test effettuati il modello CodeBERT supera il modello BERT in tutte le metriche di valutazione. Di conseguenza, si è deciso di utilizzare il modello CodeBERT per gli esperimenti successivi in cui si utilizzavano porzioni più ampie dei dati a disposizione.

Il miglior modello in questo caso si è dimostrato essere quello con concatenazione di tre chunk con un'accuratezza sul test set del 79,39% ed un F1 Micro del 88,24%, che condivide con il modello con aggregazione di tre chunk con funzione di aggregazione Max che ha per un'accuratezza leggermente inferiore. I due modelli differiscono per nelle statistiche

per classe, dove il modello con concatenazione risulta essere pi preciso mentre il modello con aggregazione risulta essere pi sensibile, avendo una recall pi alta.

## 4.4 Risultati Stacking

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti a partire dai meta-classificatori allenati sulle predizioni dei modelli di classificazione del bytecode e del codice sorgente Solidity. I risultati ottenuti sono stati calcolati utilizzando le metriche di valutazione precedentemente descritte.

I modelli base scelti sono stati il CodeBERT con tre chunk e aggregazione con la funzione Max per il codice sorgente Solidity e il CodeBERT con tre chunk e aggregazione con la funzione Mean per il bytecode.

### 4.4.1 Alberi di Decisione

L'accuratezza del modello del 79.59%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.88	0.83	0.86	2331
arithmetic	0.86	0.84	0.85	2708
other	0.83	0.86	0.84	4193
reentrancy	0.90	0.85	0.88	4838
unchecked-calls	0.95	0.94	0.94	7276
<b>Micro avg</b>	0.895	0.880	0.887	21346
<b>Macro avg</b>	0.883	0.865	0.874	21346
<b>Weighted avg</b>	0.895	0.880	0.887	21346
<b>Samples avg</b>	0.590	0.580	0.580	21346

Tabella 4.14: Classification Report per il modello Decision Tree

Gli iperparametri scelti per il modello di decision tree sono stati:

- **Criterion:** gini
- **Max Depth:** 15
- **Min Samples Leaf:** 1
- **Min Samples Split:** 2

- **Splitter:** random

Il modello si dimostra migliorativo, seppur di pochissimo rispetto ai modelli base, in tutte le metriche di valutazione, migliorando di ben quattro punti percentuali la recall sulla classe Other.

#### 4.4.2 Regressione Logistica

L'accuratezza del modello del 81.30%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.91	0.82	0.86	2331
arithmetic	0.90	0.85	0.88	2708
other	0.85	0.87	0.86	4193
reentrancy	0.91	0.87	0.89	4838
unchecked-calls	0.96	0.94	0.95	7276
<b>Micro avg</b>	0.9144	0.8835	0.8987	21346
<b>Macro avg</b>	0.9074	0.8678	0.8868	21346
<b>Weighted avg</b>	0.9147	0.8835	0.8986	21346
<b>Samples avg</b>	0.6000	0.5900	0.5800	21346

Tabella 4.15: Classification Report per il modello di Regressione Logistica

Il modello di regressione logistica si dimostra migliorativo rispetto ai modelli base in tutte le metriche di valutazione, migliorando notevolmente la precisione e la recall. Ottiene risultati peggiori solo sulla recall della classe access-control, la classe minoritaria di questo lavoro di classificazione.

#### 4.4.3 Random forest

L'accuratezza del modello del 83.46%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.



Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.91	0.85	0.88	2331
arithmetic	0.91	0.86	0.89	2708
other	0.89	0.87	0.88	4193
reentrancy	0.92	0.88	0.90	4838
unchecked-calls	0.96	0.95	0.95	7276
<b>Micro avg</b>	0.9287	0.8939	0.9110	21346
<b>Macro avg</b>	0.9212	0.8801	0.9001	21346
<b>Weighted avg</b>	0.9283	0.8939	0.9107	21346
<b>Samples avg</b>	0.6000	0.5900	0.5900	21346

Tabella 4.16: Classification Report per il modello Random Forest

Il modello si presenta dopo il tuning degli iperparametri come il migliore tra tutti i modelli proposti. Un'analisi per delle performance sull dataset di train mostra come le performance sul dataset di train siano molto alte, con un F1 Score, Precision e Recall del 98%, indicando un possibile overfitting del modello.

Riaddestrando il modello con un numero minore di alberi, si ottenuto un modello che non overfitta ma che mantiene delle performance

## 4.5 Risultati Gemini

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti a partire dalle API del modello Gemini. I risultati ottenuti sono stati calcolati utilizzando le metriche di valutazione precedentemente descritte.

L'accuratezza del modello del 27.54%. La precisione, il recall e l'F1-score per ciascuna delle classi sono mostrati nel classification report sottostante.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
access-control	0.24	0.04	0.06	171
arithmetic	0.19	0.04	0.07	198
other	0.28	0.49	0.36	282
reentrancy	0.41	0.08	0.14	364
unchecked-calls	0.45	0.20	0.28	475
<b>Micro avg</b>	0.3271	0.1872	0.2382	1490
<b>Macro avg</b>	0.3137	0.1706	0.1800	1490
<b>Weighted avg</b>	0.3490	0.1872	0.2056	1490
<b>Samples avg</b>	0.1800	0.1200	0.1300	1490

Tabella 4.17: Classification Report del modello Gemini

I risultati del modello Gemini mostrano una performance complessivamente scarsa nelle metriche di valutazione. L'Accuracy del 27.54% suggerisce che meno di un terzo delle previsioni del modello sono corrette. La Precision micro di 32.71% indica che, tra le istanze classificate positivamente, solo un terzo sono effettivamente corrette, mentre la Precision macro e weighted, rispettivamente 31.37% e 34.90%, mostrano una variabilit  nella performance sulle diverse classi. Il Recall micro di 18.72% evidenzia che il modello riesce a identificare meno di un quinto delle istanze rilevanti, con valori macro e weighted simili, indicando che il modello ha difficolt  a catturare tutte le istanze corrette. L'F1 Score, che bilancia precision e recall,   basso in tutte le versioni, suggerendo un compromesso non soddisfacente tra la capacit  del modello di evitare falsi positivi e falsi negativi. Analizzando le performance per classe, si pu  notare come il modello abbia ottenuto risultati migliori solo per la classe Other, con una recall del 49%. Interessante il risultato sulla classe reentrancy, che nonostante sia una delle vulnerabilit  pi  comuni, ha ottenuto una recall del 8%.

Complessivamente, quindi, il modello Gemini non ha ottenuto risultati soddisfacenti nella classificazione delle vulnerabilit  del codice sorgente.

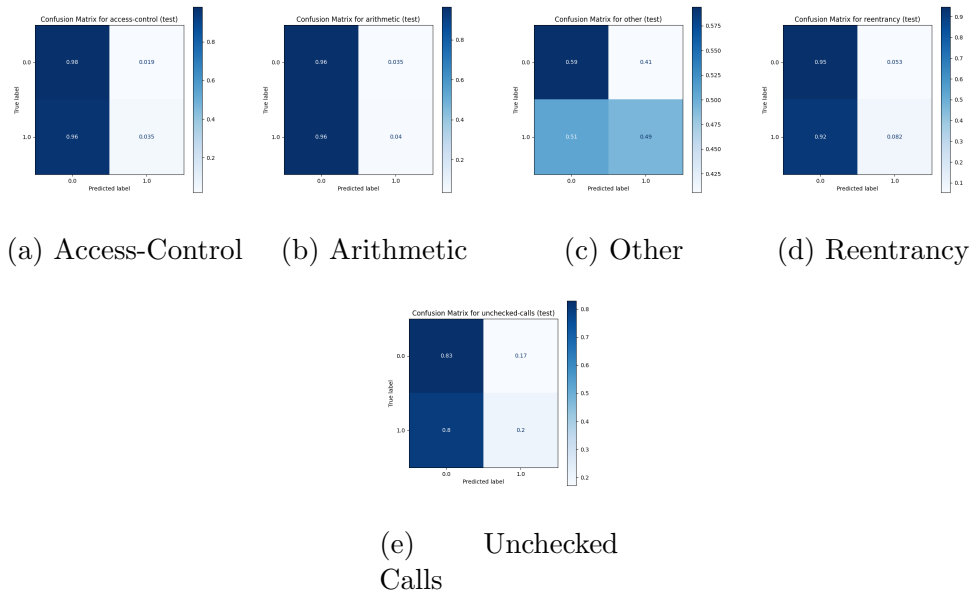


Figura 4.1: Confusion Matrices per le diverse classi

## Capitolo 5

## Conclusioni

# Bibliografia

- [1] Mythril github repository. <https://github.com/ConsenSys/mythril>.
- [2] Opyente. <https://pypi.org/project/oyente/>.
- [3] Rachit Agarwal, Tanmay Thapliyal, and Sandeep Kumar Shukla. Vulnerability and transaction behavior based detection of malicious smart contracts. *CoRR*, abs/2106.13422, 2021.
- [4] Vitalik Buterin. On public and private blockchains. <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-blockchains>, 2015.
- [5] Erik Cambria and Bebo White. Jumping nlp curves: A review of natural language processing research [review article]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 9(2):48–57, 2014.
- [6] Phil Daian. Analysis of the dao exploit. <https://hackingdistributed.com/2016/06/18/analysis-of-the-dao-exploit/>, June 18, 2016.
- [7] Weichu Deng, Huanchun Wei, Teng Huang, Cong Cao, Yun Peng, and Xuan Hu. Smart contract vulnerability detection based on deep learning and multimodal decision fusion. *Sensors*, 23(16), 2023.
- [8] Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, and Kristina Toutanova. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *CoRR*, abs/1810.04805, 2018.
- [9] Theodoros Evgeniou and Massimiliano Pontil. Support vector machines: Theory and applications. volume 2049, pages 249–257, 09 2001.
- [10] Josselin Feist, Gustavo Grieco, and Alex Groce. Slither: A static analysis framework for smart contracts. In *2019 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Emerging Trends in Software Engineering for Blockchain (WETSEB)*, pages 8–15, 2019.

- [11] Zhangyin Feng, Daya Guo, Duyu Tang, Nan Duan, Xiaocheng Feng, Ming Gong, Linjun Shou, Bing Qin, Ting Liu, Daxin Jiang, and Ming Zhou. Codebert: A pre-trained model for programming and natural languages. *CoRR*, abs/2002.08155, 2020.
- [12] Sepp Hochreiter and Jürgen Schmidhuber. Long short-term memory. *Neural Comput.*, 9(8):17351780, nov 1997.
- [13] Austin Huang, Suraj Subramanian, Jonathan Sum, Khalid Almubarak, and Stella Biderman. The annotated transformer. <https://nlp.seas.harvard.edu/annotated-transformer/>.
- [14] TonTon Hsien-De Huang. Hunting the ethereum smart contract: Color-inspired inspection of potential attacks. *CoRR*, abs/1807.01868, 2018.
- [15] Hamel Husain, Ho-Hsiang Wu, Tiferet Gazit, Miltiadis Allamanis, and Marc Brockschmidt. Codesearchnet challenge: Evaluating the state of semantic code search. *CoRR*, abs/1909.09436, 2019.
- [16] Daniel Jurafsky and James H Martin. *Speech and Language Processing*. Pearson Prentice Hall, 2nd edition, 2009.
- [17] Sukrit Kalra, Seep Goel, Mohan Dhawan, and Subodh Sharma. Zeus: Analyzing safety of smart contracts. In *Network and Distributed System Security Symposium*, 2018.
- [18] Zulfiqar Ali Khan and Akbar Siami Namin. Ethereum smart contracts: Vulnerabilities and their classifications. In *2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, pages 1–10, 2020.
- [19] Yinhan Liu, Myle Ott, Naman Goyal, Jingfei Du, Mandar Joshi, Danqi Chen, Omer Levy, Mike Lewis, Luke Zettlemoyer, and Veselin Stoyanov. Roberta: A robustly optimized BERT pretraining approach. *CoRR*, abs/1907.11692, 2019.
- [20] Oliver Lutz, Huili Chen, Hossein Fereidooni, Christoph Sendner, Alexandra Dmitrienko, Ahmad-Reza Sadeghi, and Farinaz Koushanfar. ESCORT: ethereum smart contracts vulnerability detection using deep neural network and transfer learning. *CoRR*, abs/2103.12607, 2021.
- [21] Loi Luu, Duc-Hiep Chu, Hrishi Olickel, Prateek Saxena, and Aquinas Hobor. Making smart contracts smarter. In *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, CCS '16*, page 254269, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

- [22] Anzhelika Mezina and Aleksandr Ometov. Detecting smart contract vulnerabilities with combined binary and multiclass classification. *Cryptography*, 7(3), 2023.
- [23] Mark Mossberg, Felipe Manzano, Eric Hennenfent, Alex Groce, Gustavo Grieco, Josselin Feist, Trent Brunson, and Artem Dinaburg. Manticore: A user-friendly symbolic execution framework for binaries and smart contracts. *CoRR*, abs/1907.03890, 2019.
- [24] Bernhard Mueller. Smashing ethereum smart contracts for fun and real profit. *9th HITB Security Conference*, 2018.
- [25] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. May 2009.
- [26] Ivica Nikolic, Aashish Kolluri, Ilya Sergey, Prateek Saxena, and Aquinas Hobor. Finding the greedy, prodigal, and suicidal contracts at scale. *CoRR*, abs/1802.06038, 2018.
- [27] Ivica Nikolic, Aashish Kolluri, Ilya Sergey, Prateek Saxena, and Aquinas Hobor. Finding the greedy, prodigal, and suicidal contracts at scale. *CoRR*, abs/1802.06038, 2018.
- [28] Adam Paszke, Sam Gross, Francisco Massa, Adam Lerer, James Bradbury, Gregory Chanan, Trevor Killeen, Zeming Lin, Natalia Gimelshein, Luca Antiga, Alban Desmaison, Andreas Köpf, Edward Z. Yang, Zach DeVito, Martin Raison, Alykhan Tejani, Sasank Chilamkurthy, Benoit Steiner, Lu Fang, Junjie Bai, and Soumith Chintala. Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *CoRR*, abs/1912.01703, 2019.
- [29] pcaversaccio. A historical collection of reentrancy attacks. <https://github.com/pcaversaccio/reentrancy-attacks>, 2023.
- [30] Joanne Peng, Kuk Lee, and Gary Ingersoll. An introduction to logistic regression analysis and reporting. *Journal of Educational Research - J EDUC RES*, 96:3–14, 09 2002.
- [31] Daniel Perez and Benjamin Livshits. Smart contract vulnerabilities: Does anyone care?, 02 2019.
- [32] Martina Rossini. Slither audited smart contracts dataset, 2022.
- [33] Martina Rossini, Mirco Zichichi, and Stefano Ferretti. On the use of deep neural networks for security vulnerabilities detection in smart contracts. In *2023 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, pages 74–79, 2023.

- [34] Alexander Rush. The annotated transformer. In Eunjeong L. Park, Masato Hagihara, Dmitrijs Milajevs, and Liling Tan, editors, *Proceedings of Workshop for NLP Open Source Software (NLP-OSS)*, pages 52–60, Melbourne, Australia, July 2018. Association for Computational Linguistics.
- [35] Gernot Salzer and Monika Di Angelo. A survey of tools for analyzing ethereum smart contracts. 04 2019.
- [36] Victor Sanh, Lysandre Debut, Julien Chaumond, and Thomas Wolf. Distilbert, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. *CoRR*, abs/1910.01108, 2019.
- [37] Nick Szabo. Smart contracts: Building blocks for digital markets. *Entropy*, 1996.
- [38] Nick Szabo. Formalizing and securing relationships on public networks. *First Monday*, 2(9), Sep. 1997.
- [39] Hamed Taherdoost. Smart contracts in blockchain technology: A critical review. *Information*, 14:117, 02 2023.
- [40] Sergei Tikhomirov, Ekaterina Voskresenskaya, Ivan Ivanitskiy, Ramil Takhaviev, Evgeny Marchenko, and Yaroslav Alexandrov. Smartcheck: static analysis of ethereum smart contracts. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Emerging Trends in Software Engineering for Blockchain*, WETSEB ’18, page 916, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [41] Petar Tsankov, Andrei Dan, Dana Drachsler-Cohen, Arthur Gervais, Florian Bnzli, and Martin Vechev. Securify: Practical security analysis of smart contracts. pages 67–82, 10 2018.
- [42] Pavel Vasin. Blackcoins proof-of-stake protocol v2. *URL: <https://blackcoin.co/blackcoin-pos-protocol-v2-whitepaper.pdf>*, 71, 2014.
- [43] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, and Illia Polosukhin. Attention is all you need. *CoRR*, abs/1706.03762, 2017.
- [44] Wei Wang, Jingjing Song, Guangquan Xu, Yidong Li, Hao Wang, and Chunhua Su. Contractward: Automated vulnerability detection models for ethereum smart contracts. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 8(2):1133–1144, 2021.
- [45] Yajing Wang, Jingsha He, Nafei Zhu, Yuzi Yi, Qingqing Zhang, Hongyu Song, and Ruixin Xue. Security enhancement technologies for smart contracts in the

- blockchain: A survey. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32, 12 2021.
- [46] Wikipedia. Gemini (language model) — Wikipedia, the free encyclopedia. [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gemini%20\(language%20model\)&oldid=1227938870](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gemini%20(language%20model)&oldid=1227938870), 2024.
  - [47] Wikipedia. Google DeepMind — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Google%20DeepMind&oldid=1228075682>, 2024.
  - [48] Gavin Wood. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger.
  - [49] Yonghui Wu, Mike Schuster, Zhifeng Chen, Quoc V. Le, Mohammad Norouzi, Wolfgang Macherey, Maxim Krikun, Yuan Cao, Qin Gao, Klaus Macherey, Jeff Klingner, Apurva Shah, Melvin Johnson, Xiaobing Liu, Lukasz Kaiser, Stephan Gouws, Yoshikiyo Kato, Taku Kudo, Hideto Kazawa, Keith Stevens, George Kurian, Nishant Patil, Wei Wang, Cliff Young, Jason Smith, Jason Riesa, Alex Rudnick, Oriol Vinyals, Greg Corrado, Macduff Hughes, and Jeffrey Dean. Google’s neural machine translation system: Bridging the gap between human and machine translation. *CoRR*, abs/1609.08144, 2016.
  - [50] Tom Young, Devamanyu Hazarika, Soujanya Poria, and Erik Cambria. Recent trends in deep learning based natural language processing. *CoRR*, abs/1708.02709, 2017.
  - [51] Wenbing Zhao, Shunkun Yang, Xiong Luo, and Jiong Zhou. On peercoin proof of stake for blockchain consensus. In *Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Blockchain Technology*, ICBCCT ’21, page 129134, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
  - [52] Zibin Zheng, Shaoan Xie, Hong-Ning Dai, Xiangping Chen, and Huaimin Wang. An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. 06 2017.
  - [53] Kaden Zipfel. Smart contract vulnerabilities. <https://github.com/kadenzipfel/smart-contract-vulnerabilities?tab=readme-ov-file>, 2023.