

Projeto de Compiladores

Trabalho para a disciplina Compiladores na Universidade Federal do
ABC sob orientação da Profa. Mirtha Lina Fernández Venero

André Peric Tavares, Giulio Parva Denardi

4 de Maio de 2016

Conteúdo

1	Introdução	2
2	Objetivos	2
3	Justificativa	2
4	Metodologia	3
5	Funcionamento	3
5.1	Produção de cadeia vazia	3
5.2	Representação dos conjuntos FIRST e FOLLOW	5
5.3	Cálculo dos conjuntos FIRST e FOLLOW	6
5.4	TODO LL	8
5.5	SLR	8
5.5.1	Regras	8
5.5.2	Ações	9
5.5.3	Algoritmo	10
6	Próximos passos	12
7	Documentação	12
8	Exemplo de saída	12
9	Conclusão	13

10 Adendo - notas sobre algumas decisões de <i>design</i>	13
10.1 Objetos em estados inconsistentes	13
10.2 Minimização de visibilidade	13
10.3 Minimização de mutabilidade	14
10.4 Sobrescrever <code>hashCode</code> e <code>equals</code>	15
11 Referências Bibliográficas	16

1 Introdução

O estudo de compiladores permite entender o processo de transformação de um texto de entrada escrito em determinada linguagem de programação para outra. O objetivo deste processo usualmente é adquirir o código executável correspondente à entrada. Isto permite com que programas sejam escritos em altos níveis de abstração, o que facilita o trabalho do programador.

A compilação de um texto que descreve um programa envolve diversos passos: análise léxica, *parsing*, análise sintática, análise semântica, entre outros.

Este trabalho concentra-se na fase de *parsing*. Desenvolvemos uma ferramenta que, dada uma gramática de entrada, gera as tabelas LR e LL usadas pelo *parser*. Um *LL parser* é chamado de *top-down* e analisa o texto da esquerda para a direita, usando sempre a derivação mais à esquerda. Um *LR parser* é dito *bottom-up* e

2 Objetivos

O objetivo é criar um programa que, dada uma gramática de entrada, produza e apresente passo-a-passo o cálculo dos conjuntos FIRST e FOLLOW e da construção das tabelas LL e LR.

3 Justificativa

Existem diversas ferramentas que geram as tabelas, mas geralmente os passos são omitidos ou o código é muito complexo. Neste projeto, tentamos ao mesmo tempo apresentar na saída do programa cada etapa do processo e manter o código legível e simples, mesmo quando isso significar ser menos eficiente. Deste modo, o programa beneficia aqueles que estão estudando os conceitos teóricos e também é de fácil entendimento àqueles que desejam estendê-lo.

Além disso, justificamos várias decisões do ponto de vista de Engenharia de Software em 10, apresentando na prática como várias boas práticas de programação podem ser aplicadas.

4 Metodologia

Decidimos utilizar a linguagem Java para a implementação, especialmente pelo fato de ser estática (o que previne muitos *bugs* na fase de compilação), orientada a objetos (fazendo com que seja possível abstrair muitos conceitos em classes, tornando o código organizado e simples de entender) e popular.

O código do projeto está disponível na pasta `sources`. Além disso, a versão mais atual pode ser encontrada em <https://github.com/ufabcompiladores/projetofinal>.

Utilizamos o Spring Framework (<https://spring.io/>). Assim, o *front end* é *web*, podendo ser acessado de qualquer navegador.

5 Funcionamento

5.1 Produção de cadeia vazia

O cálculo dos conjuntos FIRST e FOLLOW exigem em diversos momentos saber se um determinado não terminal produz ϵ . Por exemplo, considere a sequência de símbolos *ABC*. Queremos calcular FIRST(*ABC*). Sabemos que

$$\text{FIRST}(ABC) = \text{FIRST}(A) \oplus \text{FIRST}(BCD)$$

e o resultado desta operação é somente FIRST(*A*) se *A* não produz ϵ ou FIRST(*A*) - $\epsilon \cup \text{FIRST}(BCD)$ se $\epsilon \in \text{FIRST}(A)$. Então é conveniente saber de antemão quais símbolos produzem ϵ .

Para tanto, usa-se o método `buildAllNonTerminalsThatProduceEps` na classe `Grammar`. O algoritmo utilizado é simples: primeiro, verifica-se todos os não terminais que produzem diretamente ϵ , isto é, aqueles que têm uma regra que produz ϵ sem etapas intermediárias, como em $A \rightarrow \epsilon$.

Em seguida, todas as regras são percorridas, e se todos os símbolos da parte direita de uma regra produzem ϵ , então adicionamos o produtor dessa regra à lista de não terminais que produzem ϵ . Todas as regras são percorridas novamente até que nenhum símbolo novo tenha sido adicionado à lista de símbolos que produzem ϵ . Em outras palavras, até que o ponto fixo seja atingido.

Por exemplo, considere a seguinte gramática:

$$\begin{aligned} A &\rightarrow BC \\ B &\rightarrow \epsilon \\ C &\rightarrow \epsilon \end{aligned}$$

A tabela a seguir mostra o resultado desse algoritmo aplicado à gramática anterior em cada iteração.

Produce ϵ ?	A	B	C
Iteração 1	não	sim	sim
Iteração 2	sim	sim	sim
Iteração 3	sim	sim	sim

Na iteração 3, o conjunto de elementos que produzem ϵ não mudou, e assim o algoritmo termina.

O código é apresentado a seguir.

```
private final void buildAllNonTerminalsThatProduceEps() {
    Set<Symbol> nonTerminalsThatGenerateEps = new HashSet<Symbol>();

    // rules that directly generate eps
    for (Symbol nonTerminal : nonTerminals) {
        for (Rule rule : rules.get(nonTerminal)) {
            if (rule.producesEmptyString()) {
                nonTerminalsThatGenerateEps.add(nonTerminal);
            }
        }
    }

    // iterates until fp is found
    boolean newNonTerminalThatGeneratesEpsHasBeenFound = true;
    while (newNonTerminalThatGeneratesEpsHasBeenFound) {
        newNonTerminalThatGeneratesEpsHasBeenFound = false;
        int setSizeBeforeIteration = nonTerminalsThatGenerateEps.size();

        for (Symbol nonTerminal : nonTerminals) {
            for (Rule rule : rules.get(nonTerminal)) {
                // verifies if all symbols from rule produce eps
                List<Symbol> production = rule.getProduction();
                boolean allSymbolsFromProductionProduceEps;
                allSymbolsFromProductionProduceEps = production
                    .stream()
```

```

        .allMatch(symbol -> nonTerminalsThatGenerateEps.contains(symbol));

        // if so, add it to set
        if (allSymbolsFromProductionProduceEps) {
            nonTerminalsThatGenerateEps.add(nonTerminal);
        }
    }
}

// verifies whether some non terminal has been added to set
int setSizeAfterIteration = nonTerminalsThatGenerateEps.size();
if (setSizeBeforeIteration != setSizeAfterIteration) {
    newNonTerminalThatGeneratesEpsHasBeenFound = true;
}
}

// initialise Map
Map<Symbol, Boolean> producesEps = new HashMap<Symbol, Boolean>();
for (Symbol nonTerminal : nonTerminals) {
    producesEps.put(nonTerminal,
        nonTerminalsThatGenerateEps.contains(nonTerminal));
}
for (Symbol terminal : terminals) {
    producesEps.put(terminal, false);
}

this.nonTerminalsToProducesEps = producesEps;
}

```

5.2 Representação dos conjuntos FIRST e FOLLOW

Uma das principais funcionalidades do programa deste trabalho é não só calcular os conjuntos FIRST e FOLLOW, mas fazer isso apresentando as etapas intermediárias, fazendo com que o usuário veja cada passo do algoritmo. Isso faz com que o cálculo desses conjuntos não seja o mais eficiente possível, pois precisamos lidar também com o *output* sem pular nenhuma etapa.

Para isto, criamos classes **First** e **Follow**. Estas classes têm atributos que indicam a *representação* do conjunto dado em termos de outros conjuntos.

Por exemplo, considere os seguintes atributos da classe **Follow**:

```

private Set<Symbol> firstSets;
private Set<Symbol> firstSetsWithoutEps;
private Set<Symbol> followSets;
private Set<Symbol> terminals;
private boolean hasEOF;

```

Suponha que um objeto dessa classe tenha as seguintes atribuições (aqui em notação de teoria dos conjuntos):

$$\begin{aligned}
 \text{firstSets} &= \{A\} \\
 \text{firstSetsWithoutEps} &= \{B, C\} \\
 \text{followSets} &= \{D\} \\
 \text{terminals} &= \{a, b\} \\
 \text{hasEOF} &= \text{true}
 \end{aligned}$$

Então esse conjunto seria

$$\text{FIRST}(A) \cup (\text{FIRST}(B) - \epsilon) \cup (\text{FIRST}(C) - \epsilon) \cup \text{FOLLOW}(D) \cup \{a\} \cup \{b\} \cup \{\$ \}$$

Ambas as classes têm o método `toString` sobrescrito para exibir essa representação como mostrado acima e um método `getAllElements` que coleta todos os elementos vindos da união dos conjuntos.

5.3 Cálculo dos conjuntos FIRST e FOLLOW

De maneira semelhante à computação de todos os não terminais que geram ϵ , o cálculo dos conjuntos FIRST e FOLLOW consiste, em essência, em iterar até encontrar um ponto fixo.

Note que a aplicação direta da definição de FIRST e FOLLOW não funciona, pois ela falharia no caso de definições recursivas que são dependentes entre si. Por exemplo, considere o caso em que $\text{FIRST}(A) = \text{FIRST}(B)$ e $\text{FIRST}(B) = \text{FIRST}(A)$. Para calcular $\text{FIRST}(A)$, calcula-se $\text{FIRST}(B)$. Mas $\text{FIRST}(B)$ é $\text{FIRST}(A)$, o que resulta num *loop* infinito. Em vez disso, começamos com todos os conjuntos FIRST setados para \emptyset , e a cada iteração atualizamos todos os conjuntos até atingir um ponto fixo.

O código a seguir mostra a implementação desse algoritmo para o cálculo dos conjuntos FIRST.

```

public final void buildAllFirstSets() {

```

```

// Initialize set
// omitido

// Get description of each first set
Map<Symbol, First> firstSetDescriptions = buildAllFirstSetDescriptions();

// Iterate until fixed point is found
boolean someFirstSetHasChanged = true;
while (someFirstSetHasChanged) {
    StringBuilder iterationSb = new StringBuilder();
    iterationSb.append("New iteration (building first sets)\n");
    someFirstSetHasChanged = false;

    // Copy elements from old first sets to new first sets
    // omitido

    // Updates, possibly getting new elements
    for (Symbol nonTerminal: nonTerminals){
        iterationSb.append(String.format("Updating First(%s)\n", nonTerminal));
        First firstDescription = firstSetDescriptions.get(nonTerminal);
        iterationSb.append(String.format
            ("First(%s) = %s\n", nonTerminal, firstDescription));
        int numElementsBefore = firstSetsBeforeIteration.get(nonTerminal).size();
        firstSetsAfterIteration.get(nonTerminal).addAll
            (firstDescription.getAllElements(firstSetsBeforeIteration));
        iterationSb.append(String.format("Adding elements: %s\n",
            firstDescription.getAllElements(firstSetsBeforeIteration)));
        int numElementsAfter = firstSetsAfterIteration.get(nonTerminal).size();
        if (numElementsBefore != numElementsAfter){
            someFirstSetHasChanged = true;
        }
    }
}

iterationSb.append(String.format("All elements form
    first sets before iteration: %s\n", firstSetsBeforeIteration));
iterationSb.append(String.format("All elements form
    first sets after iteration: %s\n\n", firstSetsAfterIteration));

firstSetsBeforeIteration = firstSetsAfterIteration;
}

```

```

    this.firstSets = firstSetsBeforeIteration;
}

```






O cálculo dos conjuntos FOLLOW é bastante semelhante, e por isso é omitido.

5.4 TODO LL

5.5 SLR

5.5.1 Regras

Usamos a classe `RuleWithDot` para representar os itens dos estados. Um objeto dessa classe têm listas de símbolos para representar o que vem antes e depois do ponto. Por exemplo, a regra $A \rightarrow BC.DE$ teria BC em `symbolsBeforeDot` e DE em `symbolsAfterDot`.

<<Java Class>>	
 RuleWithDot com.ex.entity	
<ul style="list-style-type: none"> ▣ producer: Symbol ▣ symbolsBeforeDot: List<Symbol> ▣ symbolsAfterDot: List<Symbol> ▣ number: int 	
<ul style="list-style-type: none"> ▣  RuleWithDot() ●  RuleWithDot(Rule,boolean) ●  RuleWithDot(Symbol,List<Symbol>,List<Symbol>,int) ● getNumber():int ● getProducer():Symbol ● toString():String ● hashCode():int ● equals(Object):boolean ● hasNonEmptySymbolAfterDot():boolean ● hasNonEmptySymbolBeforeDot():boolean ● firstSymbolAfterDot():Symbol ●  generateRuleWithShiftedDot(RuleWithDot):RuleWithDot 	

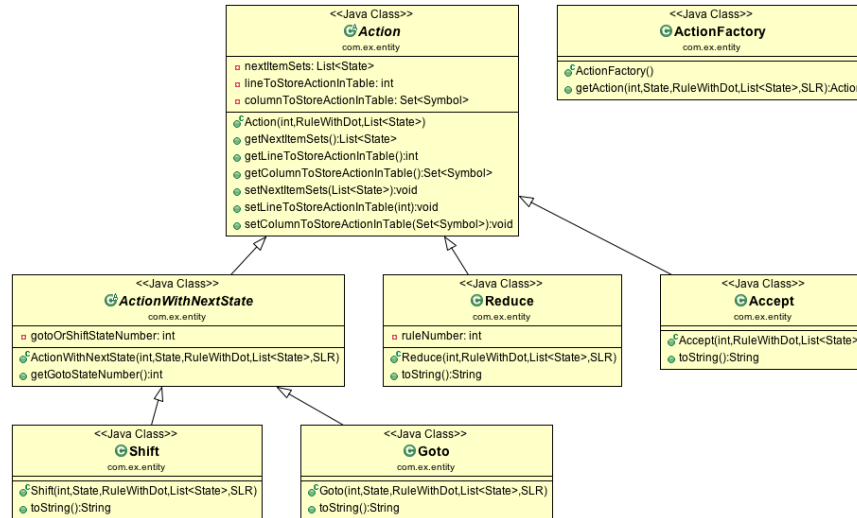
O método `generateRuleWithShiftedDot` serve para gerar um novo objeto do tipo `RuleWithDot` com o ponto deslocado para a direita. Usando o exemplo anterior, o objeto gerado a partir de $A \rightarrow BC.DE$ representaria $A \rightarrow BCD.E$. Note que o objeto retornado é um novo. Não há efeitos colaterais.

5.5.2 Ações

Ações no contexto da tabela SLR são representadas por classes.

Além de ter um tipo específico, uma `Action` contém atributos para indicar sua posição na tabela, a saber, `lineToStoreActionInTable` e `columnToStoreActionInTable`.

Assim, a partir de uma lista de todos os objetos do tipo `Action` gerados é possível construir a tabela SLR.



As ações `Shift` e `Goto` têm o método `getGotoStateNumber`, cujo resultado é armazenado em `gotoOrShiftStateNumber`.

Esse atributo armazena o número do estado que deve ser usado após executar a ação. Por exemplo, para um objeto `Shift` que representa a ação *shift* 8, esse número é 8. Note que esse número pode indicar um estado que já existe ou um novo.

Além disso, todas as ações têm um atributo `nextItemSets` que possui uma lista de todos os estados descobertos após essa ação. Se a ação é `Accept` ou `Reduce`, essa lista é exatamente a mesma de antes. Por outro lado, no caso de `Shift` e `Goto`, calcula-se `goto(q, a)`, em que q é o estado sendo analisado e a é o primeiro símbolo após o ponto, e se o resultado de `goto(q, a)` não estiver na lista de estados conhecida até então, um novo estado é adicionado a ela. Se o resultado de `goto(q, a)` já estiver na lista de estados, então esta

permanece a mesma.

O código abaixo ilustra esse processo no caso do `ActionWithNextState`.

```
public ActionWithNextState(int currentStateNumber, State state,
    RuleWithDot ruleWithDot, List<State> allStates, SLR slr) {
    super(currentStateNumber, ruleWithDot, allStates);
    List<State> newItemSets = new ArrayList<State>();
    newItemSets.addAll(allStates);

    // Sets next state number and the new list of states.
    State nextState = slr.gotoSet(state, ruleWithDot.firstSymbolAfterDot());
    this.gotoOrShiftStateNumber = slr.getStateNumber(nextState, allStates);
    if (gotoOrShiftStateNumber == allStates.size()) {
        newItemSets.add(nextState);
    }
    setNextItemSets(newItemSets);
}
```

Note que `newItemSets` é uma *nova* lista de estados. Assim, não há efeitos colaterais envolvidos.

5.5.3 Algoritmo

Ainda à maneira do cálculo dos conjuntos anteriores, o algoritmo consiste em adicionar novos estados à lista de estados até encontrar um ponto fixo. No entanto, a implementação é um pouco mais complicada, pois o conjunto de estados que estamos iterando é alterado durante a iteração.

```
private final void buildAllItemSets() {
    System.out.println("\n\n\n=====");
    System.out.println("Building all states.");

    // adding first state
    System.out.println("Adding first state set:");
    List<State> allStatesBeforeIteration = new ArrayList<State>();
    Set<RuleWithDot> firstRuleSet = grammarWithDots.get
        (grammar.getStartSymbol());
    State firstState = closure(new State(firstRuleSet));
    allStatesBeforeIteration.add(firstState);

    ActionFactory actionFactory = new ActionFactory();
```

```

int indexOfLastStateInWhichAllRulesWereAnalysed = -1;
boolean setOfAllStatesHasChanged = true;
while (setOfAllStatesHasChanged) {
    System.out.println("***** New iteration
        (building all state sets) *****");
    setOfAllStatesHasChanged = false;
    List<State> allStatesAfterIteration = new ArrayList<State>();
    allStatesAfterIteration.addAll(allStatesBeforeIteration);

    for (int currentStateNumber =
        indexOfLastStateInWhichAllRulesWereAnalysed + 1;
        currentStateNumber < allStatesBeforeIteration.size(); currentStateNumber++) {
        State state = allStatesAfterIteration.get(currentStateNumber);
        System.out.format("Analysing state %s: %s\n", currentStateNumber, state);
        for (RuleWithDot ruleWithDot : state.getRules()) {
            System.out.println("~~Analysing rule~~");
            System.out.format("Analysing rule: %s\n", ruleWithDot);
            Action act = actionFactory.getAction
                (currentStateNumber, state, ruleWithDot, allStatesAfterIteration, this);
            this.allActions.add(act);
            System.out.format("\nCreating action: \n %s\n", act);
            System.out.format("Action position:\n Line: %s \n Columns: %s\n\n",
                act.getLineToStoreActionInTable(), act.getColumnToStoreActionInTable());
            allStatesAfterIteration = act.getNextItemSets();
        }
        indexOfLastStateInWhichAllRulesWereAnalysed++;
    }

    if (allStatesAfterIteration.size() != allStatesBeforeIteration.size()) {
        setOfAllStatesHasChanged = true;
    }

    allStatesBeforeIteration = allStatesAfterIteration;
}
System.out.format("All state sets found: %s", allStatesBeforeIteration);
this.allStates = allStatesBeforeIteration;
}

```

O código itera do último estado completamente analisado (isto é, cujas

regras já tiveram as ações correspondentes criadas) até o último estado conhecido. Para cada item de cada estado é criada uma ação. Um objeto da classe `ActionFactory` decide qual é o tipo de ação a ser criada analisando qual é o símbolo após o ponto. Após a criação da ação, esta tem seu método `getNextItemSets` executados, que retorna a nova lista de estados (possivelmente com um novo estado, se a ação criada for um Shift ou Goto).

6 Próximos passos

A construção deste programa mostrou-se bastante trabalhosa, e à medida em que o desenvolvimento avançou, foi possível detectar alguns pontos que ainda podem melhorar. Listamos a seguir quais seriam os próximos passos para aperfeiçoar o código.

- Simplificar o método `buildAllItemSets`. É possível usar um `while` em vez de `foreach`, de tal forma que não é necessário fazer a distinção entre conjunto de estados antigo e novo.
- É fortemente recomendada a inclusão de `unit tests` para métodos que envolvem computações importantes nos algoritmos, tornando futuros *refactorings* mais seguros.
- Buscar utilizar mais métodos de programação funcional introduzidos no Java 8 quando isso tornar o código mais simples.

7 Documentação

A documentação em Javadoc está disponível em `sources/doc`. Foram feitos *document comments* para os métodos não triviais.

8 Exemplo de saída

Um exemplo de saída do programa está disponível no arquivo `outputExample.txt`.

9 Conclusão

10 Adendo - notas sobre algumas decisões de *design*

10.1 Objetos em estados inconsistentes

É desejável que um objeto tenha um estado consistente imediatamente após sua criação. Em termos prático, isso significa usar seu construtor para setar todos os atributos necessários. O contrário disso (e, portanto, não recomendado) é não inserir nada no construtor e depois colocar valores nos atributos através de *setters*. Essa prática torna o código menos seguro, pois enquanto todos os atributos não estão setados, o objeto está num estado inconsistente. Nesse contexto, acessar um atributo não inicializado retornaria `null`.

Exemplo de código que segue esse princípio:

```
public Grammar(String inputGrammar) throws Exception {
    initialiseOutputMap();

    this.numberOfRules = 0;
    this.rules = new HashMap<Symbol, Set<Rule>>();
    this.terminals = new HashSet<Symbol>();
    this.nonTerminals = new HashSet<Symbol>();

    isValidGrammar(inputGrammar);

    this.startSymbol = addStartSymbol(inputGrammar);
    addNonTerminals(inputGrammar);
    addTerminals(inputGrammar);
    readAllRules(inputGrammar);
    buildAllNonTerminalsThatProduceEps();
    buildAllFirstSets();
    buildAllFollowSets();
    printOutput();
}
```

10.2 Minimização de visibilidade

Classes que não serão estentidas devem ser declaradas como `final`. O mesmo vale para métodos que não devem ser sobrescritos.

```
// exemplo
public final class Rule {
```

Os atributos e métodos devem ter a *menor* visibilidade possível. Em geral, isso significa usar **private** sempre que possível.

Além disso, é recomendável minimizar o uso de *accessors*. *getters* e *setters* devem ser adicionados apenas quando necessário. Em vez deles, é preferível criar métodos que, acessando a informação interna do objeto, retorne o que foi pedido. Isto está em acordo com o princípio "Tell, Don't Ask". A aplicação desse princípio mostrou-se difícil para o projeto, pois a interação entre objetos nos algoritmos depende essencialmente de seus atributos.

```
// extraído da classe RuleWithDot

// não há acessor para o atributo symbolsAfterDot,
// pois em momento algum há necessidade de saber isso.
// No entanto, outras classes podem precisar do símbolo após o ponto.
// Elas devem usar o método abaixo.
// O incorreto seria criar um getter para symbolsAfterDot e fazer com
// que as demais classes o usassem, seguidos de get(0).
// Isso violaria o encapsulamento da classe RuleWithDot.
public Symbol firstSymbolAfterDot() {
    return symbolsAfterDot.get(0);
}
```

Este princípio está descrito em Effective Java - Item 13: Minimize the accessibility of classes and members.

10.3 Minimização de mutabilidade

Algumas classes representam entidades imutáveis. Por exemplos, uma classe **Coordenada** que tem um par de inteiros como atributos e que representa uma coordenada deve ser imutável. Criar um *setter* para esta classe seria absurdo, pois o mesmo objeto poderia representar uma infinidade de coordenadas diferentes.

Além disso, mutabilidade pode tornar o código complexo e de difícil compreensão.

Identificamos classes que representam entidades imutáveis e nos certificamos que seus objetos de fato não podem jamais ser alterados. A classe **Symbol** ilustra isso bem.

```
// classe é marcada como final
public final class Symbol {

// atributos são privados
    private SymbolType type;
    private String literalRepresentation;

// não há setters
    public Symbol(String literalRepresentation) throws Exception {
        super();
        this.literalRepresentation = literalRepresentation;
        this.type = getType(literalRepresentation);
    }
}
```

Este princípio está descrito em Effective Java - Item15: Minimize mutability.

10.4 Sobrescrever hashCode e equals

Em diversos momentos utilizamos `equals`. Por exemplo, em SLR, quando o conjunto goto de uma ação é calculado, verificamos se o conjunto é igual a algum estado que já está represente na lista de estados. Para tanto, `equals` é usado para comparar objetos da classe `State`.

Isso só é possível de ser feito de forma correta porque `hashCode` também foi sobrescrito. Isso acontece porque ao checar a igualdade de objetos, antes de de fato executar o código sobrescrito em `equals`, verifica se os códigos *hash* dos dois objetos são iguais. Se não são, então a comparação resulta em `false`, mesmo se todas as condições do `equals` fossem satisfeitas.

```
// extraído da classe Symbol
@Override
public int hashCode() {
    final int prime = 31;
    int result = 1;
    result = prime * result +
        ((literalRepresentation == null) ? 0 : literalRepresentation.hashCode());
    result = prime * result + ((type == null) ? 0 : type.hashCode());
    return result;
}

@Override
```

```

public boolean equals(Object obj) {
    if (this == obj)
        return true;
    if (obj == null)
        return false;
    if (getClass() != obj.getClass())
        return false;
    Symbol other = (Symbol) obj;
    if (literalRepresentation == null) {
        if (other.literalRepresentation != null)
            return false;
    } else if (!literalRepresentation.equals(other.literalRepresentation))
        return false;
    if (type != other.type)
        return false;
    return true;
}

```

Este princípio está descrito em *Effective Java*- Item 9: Always override hashCode when you override equals.

11 Referências Bibliográficas

Compilers: Principles, Techniques, & Tools Addison-Wesley series in computer science, 2a edição, Pearson/Addison Wesley, 2007.